

# Ansatz zur ganzheitlichen Entwurfsoptimierung am Beispiel von Bürogeschossbauten

Vom Fachbereich für Bauingenieurwesen  
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina  
zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Martin Siffling

aus Karlsruhe

Eingereicht am:	04.02.2000
Mündliche Prüfung:	29.06.2000
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. D. Hosser Prof. Helmut C. Schulitz Prof. Dr.rer.nat. M. Wermuth



Meinem Vater gewidmet



## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Assistent an der TU Braunschweig.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Dietmar Hosser, der mich sehr bei der Entwicklung des Themas und bei der Bearbeitung unterstützt und gefördert hat.

Herrn Prof. Helmut C. Schultz danke ich für seine Unterstützung bei der Durchführung meiner Arbeit und für die Übernahme des Zweitberichters .

Des Weiteren danke ich Herrn Prof. Dr. rer.nat. Manfred Wermuth für die Übernahme des Drittberichters und Herrn Prof. Dr.-Ing. Udo Peil für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Für die produktive Zusammenarbeit, die Unterstützung bei der praktischen Anwendung meiner Arbeit und bei der Durchführung von Vergleichsberechnungen am Beispiel der Edding AG danke ich im besonderen Maße den Architekten Herrn Prof. Hans Struhk und Herrn Jochen Goede.

Bei meinen Kolleginnen und Kollegen vom Institut für Baukonstruktionen + Industriebau der TU Braunschweig, bedanke ich mich für die kollegiale und fachliche Unterstützung.

Insbesondere bedanke ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Karl-Friedrich Fröh für die Korrektur des Manuskriptes und bei Herrn Thomas Müller für die Anfertigung der Zeichnungen.



# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Ausgangsüberlegungen.....	1
1.2	Thema und Zielsetzung.....	2
1.3	Aufbau der Arbeit.....	2
2	Modellgrundlagen.....	3
2.1	Allgemeines.....	3
2.2	Modellanforderungen.....	3
2.3	Modellstruktur.....	5
2.3.1	Optimierungsmodul.....	5
2.3.2	Entwurf.....	6
2.3.3	Berechnung.....	6
2.3.4	Beurteilung.....	6
2.3.5	Allgemeine Module.....	6
3	Entwurfsoptimierung.....	7
3.1	Definition.....	7
3.2	Grundprinzip der Optimierung.....	7
3.3	Optimierungsverfahren.....	8
3.3.1	Lineare Optimierung.....	8
3.3.2	Nichtlineare Optimierung.....	8
3.3.3	Ganzzahlige Optimierung.....	9
3.4	Anforderungen an ein Optimierungsverfahren.....	9
3.5	Auswahl eines Optimierungsverfahrens.....	9
3.6	Genetische Algorithmen.....	11
3.6.1	Der Pseudocode eines GA.....	11
3.6.2	Codierung.....	11
3.6.3	Fitness- und Bewertungsfunktion.....	13
3.6.4	Crossover/Rekombination.....	13
3.6.5	Mutation.....	14
3.6.6	Heiratsschema/Selektion.....	15
3.6.7	Ersetzungsschema.....	16
3.7	Lösungsansatz.....	16
3.7.1	Codierung.....	16
3.7.2	Crossover.....	18
3.7.3	Ersetzungsschema.....	18
3.7.4	Steuerung der Berechnung.....	19
3.7.5	Einzelberechnung.....	20
3.7.6	Bewertung / Fitnessfunktion.....	21
3.7.7	Zusammenfassung Lösungsansatz.....	23
3.8	Testfunktion.....	25
3.8.1	Definition Testfunktion.....	25
3.8.2	Vergleichsberechnungen für n=10.....	25
3.9	Beispiel Entwurfsoptimierung.....	28
3.9.1	Grundriss Bürogeschoss.....	29
3.9.2	Optimierungskriterien.....	29
3.9.3	Entwurfsvariablen.....	29

3.9.4	Berechnung der Kriterien .....	29
3.9.5	Bewertungs- und Fitnessfunktion .....	30
3.9.6	Vergleichsberechnungen.....	31
3.10	Diskussion .....	33
4	Entwurf von Bürogeschossbauten .....	35
4.1	Methodischer Ansatz zur Entwurfsoptimierung .....	35
4.2	Analyse Bürogeschossbauten .....	36
4.3	Definition der Entwurfsparameter und ihrer Abhängigkeiten .....	37
4.3.1	Bürotyp .....	37
4.3.2	Bürostruktur .....	38
4.3.3	Definition Standardbüro .....	39
4.3.4	Raster .....	40
4.3.5	Trennwände .....	41
4.3.6	Fassadentyp .....	42
4.3.7	Stellung der Außenstütze .....	42
4.3.8	Fensterhöhe.....	44
4.3.9	Installation.....	45
4.3.10	Unterdecken / abgehängte Decken .....	46
4.3.11	Fußbodenaufbau .....	46
4.3.12	Lichte Raumhöhe .....	47
4.3.13	Tiefgarage.....	47
4.3.14	Stützenstellung der Innenstütze .....	48
4.3.15	Tragwerk.....	49
4.3.16	Längsgeometrie .....	55
4.3.17	Öffnungen in Geschossdecken .....	57
4.3.18	Dachgeschoss .....	57
4.3.19	Erdgeschoss .....	58
4.3.20	Kellergeschoss.....	59
4.3.21	Flurbreite.....	59
4.3.22	Brandschutzvorschriften.....	59
4.4	Variableneinteilung .....	60
4.5	Berechnung Grundmodul .....	63
5	Beurteilung von Bürogebäuden .....	64
5.1	Allgemeines .....	64
5.2	Baukosten .....	65
5.2.1	Herstellkosten .....	66
5.2.2	Baunutzungskosten.....	73
5.3	Flexibilität.....	85
5.4	Geometrieparameter .....	87
5.5	Investitionsanalyse .....	87
5.6	Energiebedarf .....	88
5.7	Entwicklung von Optimierungskriterien.....	89
6	Softwareentwicklung .....	90
6.1	Allgemeines .....	90
6.2	Allgemeine Programmstruktur .....	90
6.2.1	Funktionsweise Programm.....	91



6.2.2	Verschiedene Anwendungsmöglichkeiten .....	93
6.3	Beschreibung der Einzelmodule .....	93
6.3.1	Geometriemodul .....	93
6.3.2	Berechnungsmodule .....	93
6.3.3	Programmoberfläche .....	99
7	Parameterstudien am Beispiel der Edding AG Ahrensburg .....	102
7.1	Allgemeines .....	102
7.2	Edding AG Ahrensburg .....	102
7.2.1	Baubeschreibung .....	102
7.2.2	Baukonstruktive Durchbildung .....	105
7.2.3	Basisdaten .....	107
7.2.4	Vergleichsberechnung Edding AG, Haus 3 .....	109
7.3	Vergleichsberechnungen .....	110
7.3.1	Allgemeines .....	110
7.3.2	Systematik der Vergleichsberechnungen .....	111
7.3.3	Sensitivitätsanalysen .....	112
8	Ergebnisse .....	113
8.1	Überblick .....	113
8.2	Auswertung Optimierungsergebnisse .....	114
8.2.1	Optimierung 1 (max. Herstellkosten) .....	114
8.2.2	Optimierung 2 (min. Rohbaukosten) .....	118
8.2.3	Optimierung 3 (min. Nutzungskosten) .....	121
8.2.4	Optimierung 4 (min. Herstellkosten + min. Rohbaukosten) .....	123
8.2.5	Optimierung 5 (min. Herstellkosten + min. Nutzungskosten) .....	125
8.2.6	Optimierung 6 (min. Rohbaukosten + min. Nutzungskosten) .....	127
8.2.7	Optimierung 7 (min. Herstellkosten + min. BRI) .....	130
8.2.8	Optimierung 8 (min. Rohbaukosten + min. BRI) .....	133
8.3	Auswertung bezogen auf Entwurfsparameter .....	135
8.3.1	Leichte Trennwände .....	135
8.3.2	Unterdecke .....	135
8.3.3	Elektroinstallation .....	135
8.3.4	Heizungs- Lüftungsinstallation .....	135
8.3.5	Fußboden .....	135
8.3.6	Raster .....	135
8.3.7	Stützenstellung außen .....	136
8.3.8	Stützenstellung innen .....	136
8.3.9	Flurbreite .....	137
8.3.10	Längsgeometrie .....	137
8.3.11	Stützenstellung .....	137
8.3.12	Deckenkonstruktion .....	137
8.3.13	Ausführung der StB-Stützen .....	138
8.3.14	Profilwahl Stahlverbundträger .....	138
8.3.15	Montageart Stahlverbundträger .....	138
8.3.16	Deckenart Stahlverbundbauweise .....	138
8.4	Allgemeine Aussagen .....	138
9	Zusammenfassung und Ausblicke .....	141
10	Literaturverzeichnis .....	143
ANHANG		



# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangsüberlegungen

Neben der klassischen Massivbauweise aus Ortbeton und/oder Betonfertigteilen hat sich in den letzten 10 – 15 Jahren eine neue Bauweise entwickelt, die aus dem Verbund von Profilstahl und Beton besteht. Diese Bauweise wird als Stahl-Beton-Verbundbauweise bezeichnet. Im folgenden wird nur noch von der Verbundbauweise gesprochen. Das Prinzip besteht darin, dass die beiden Werkstoffe Stahl und Beton jeweils materialgerecht eingesetzt werden. Das bedeutet, dass Stahl für die auftretenden Zugkräfte und Beton für die auftretenden Druckkräfte eingesetzt wird. Diese Bauweise findet ihren Einsatz im wesentlichen im Hoch- und Brückenbau und wird in der Literatur [8], [23], [25], [39], [42], [43], [44], [47], [52], [57], [62] und [87] wegen der vielen Vorteile von Konstruktion, Montage, Bauablauf, Ausbau etc. sehr gelobt. Allerdings ist sie trotz der vielen Vorteile im Hochbau nicht sehr verbreitet.

Es stellen sich daher folgende Fragen:

1. Warum nimmt die Verbundbauweise im Hochbau einen so geringen Marktanteil ein?
2. Welche Maßnahmen sind notwendig, um den Marktanteil zu vergrößern?

Eine Ursache des geringen Marktanteils liegt in der Unsicherheit und Unerfahrenheit der Planer. Aus diesem Grund werden viele Hochbauten als Betonbauten geplant. Da die Tragkonstruktion unter anderem von der Bauweise abhängt, kann eine Betonkonstruktion nicht problemlos in eine Verbundkonstruktion übersetzt werden. Somit hat die Verbundbauweise keine reelle Chance, sich als Alternative zu einem als Betonbau geplanten Gebäude durchzusetzen.

Eine weitere Ursache wird in der Betrachtung, der Beurteilung und der Vergabe von einzelnen Gewerken im Bauablauf gesehen. Die Vergabe einer Bauleistung erfolgt in der Regel nicht im Zusammenhang des ganzen Bauwerks. So werden beispielsweise bei der Auswahl alternativer Bauweisen oft nur die Rohbaukosten verglichen. Dabei werden Einsparungen, die durch die Vorteile der Verbundbauweise im weiteren Projektverlauf erzielt werden könnten, nicht berücksichtigt.

Basierend auf diesen Überlegungen wird klar, dass eine vergleichende Analyse der Tragelemente wie Decken, Träger und Stützen und der Versuch daraus Verbesserungen abzuleiten, nicht der richtige Ansatz sind, um die Chancen der Verbundbauweise entscheidend zu verbessern. Es ist vielmehr eine ganzheitliche Betrachtungsweise erforderlich, die alle Anforderungen, Randbedingungen und Abhängigkeiten berücksichtigt. Für die Analyse und die Ableitung einer bestmöglichen Entwurfslösung ist eine systematische Erfassung und Einbindung aller Parameter und ihrer Einflüsse und Auswirkungen in ein rechnergestütztes Optimierungsmodell sinnvoll. Die Lösung der Frage nach der bestmöglichen Entwurfslösung wird im folgenden als Entwurfsoptimierung bezeichnet.

Eine ganzheitliche Betrachtungsweise ist nicht nur bei der Untersuchung der Verbundbauweise im Hochbau, sondern allgemein bei jeder Entwurfsaufgabe erforderlich. Da in der Literatur bisher kein entsprechendes Modell veröffentlicht wurde, besteht somit der Bedarf, ein allgemeines analytisches Modell zu entwickeln.

Die Entwicklung und Einführung eines rechnergestützten Optimierungs- und Simulationsmodells für den Planungsprozess, das im folgenden als Entwurfsoptimierung bezeichnet wird, stellt eine wesentliche Neuerung bei der Bearbeitung von Planungsaufgaben dar. Durch die systematische Erfassung aller Entwurfsvariablen, durch die mathematische Formulierung der Abhängigkeiten und durch die Einbindung in ein EDV-Modell wird ein wichtiges Instrument geschaffen, das für komplexe Planungsaufgaben sehr schnell Lösungsvarianten erzeugt und diese sehr transparent für Planer und Bauherren aufbereitet. Somit können wichtige Entwurfsentscheidun-

gen auf einer fundierten Datenbasis sehr früh im Planungsprozess getroffen werden und ermöglichen so eine sichere und schnelle Projektdurchführung.

Da das Modell für jede Bauaufgabe speziell angepasst und ergänzt werden muss, werden, auf der Basis einer statistischen Auswertung der Baugenehmigungen im Hochbau, Bürogeschossbauten für eine exemplarische Anwendung ausgewählt. (siehe Anlage A1)

## **1.2 Thema und Zielsetzung**

Aus den obigen Überlegungen wird das Thema der Arbeit abgeleitet:

### **„Ansatz zur ganzheitlichen Entwurfsoptimierung am Beispiel von Bürogeschossbauten“**

Ziel der Arbeit ist es, ein allgemeingültiges Basismodell für die Entwurfsoptimierung herzuleiten. Mit Hilfe dieses Basismodells soll ein methodischer Ansatz zur Anwendung auf allgemeine Entwurfsaufgaben entwickelt werden.

Dieser Ansatz wird exemplarisch auf Bürogeschossbauten angewendet und es sollen am Beispiel eines bestehenden Bürogebäudes die Funktions- und Gebrauchsfähigkeit sowie die Vorteile dieser Methode gegenüber der herkömmlichen Planung bewiesen werden.

## **1.3 Aufbau der Arbeit**

Die Arbeit gliedert sich im wesentlichen in drei Teile. Im ersten Teil werden die Grundlagen zur Modellbildung hergeleitet. Aus der Analyse der ganzheitlichen, rechnergestützten Betrachtung, im Vergleich zur herkömmlichen Planung, werden die Modellanforderungen abgeleitet. Weiterhin werden die verschiedenen Elemente definiert und die allgemeine Struktur entwickelt.

Im zweiten Teil wird, nach einer kurzen Einführung in das Thema der Optimierung, ein Verfahren für die weitere Anwendung ausgewählt. Dieses wird allgemein beschrieben, und es wird die Funktionsweise erläutert. Gemäß den Anforderungen der Entwurfsoptimierung wird dieses Verfahren entsprechend angepasst, zu einem Basismodell der Entwurfsoptimierung weiterentwickelt und an verschiedenen Testbeispielen überprüft.

Im dritten Teil der Arbeit wird, ausgehend von dem Basismodell, ein allgemeiner methodischer Ansatz zur Entwurfsoptimierung vorgeschlagen. Dieser Ansatz wird exemplarisch auf Bürogeschossbauten angewendet. Dazu werden die notwendigen Parameter, Abhängigkeiten und Kriterien systematisch erfasst und mathematisch formuliert. Darüber hinaus wird für die nachfolgenden Berechnungen eine entsprechende Anwendungssoftware entwickelt.

Am Beispiel eines realisierten Bürogebäudes werden umfangreiche Vergleichsberechnungen durchgeführt und damit die Funktions- und Gebrauchsfähigkeit der Methode bewiesen. Die aus den durchgeführten Berechnungen gewonnenen Ergebnisse und Erfahrungen werden verwendet, um kritisch die Modellentwicklung und die einzelnen Entscheidungen zu überprüfen. Daraus werden Ausblicke für die Weiterentwicklung und Verbesserung sowie für weitere Anwendungsmöglichkeiten gegeben.

## 2 Modellgrundlagen

### 2.1 Allgemeines

Die Überlegungen zur Entwicklung einer rechnergestützten ganzheitlichen Entwurfsoptimierung verfolgen nicht das Ziel, den Entwurfsprozess zu automatisieren oder gar zu ersetzen. Dies ist schon allein wegen Menge der Aufgaben und der Randbedingungen nicht möglich. Darüber hinaus spielen bei jedem Entwurf auch subjektive Kriterien wie die Gestaltung, die Form, der Ausstattungsanspruch etc. eine Rolle, die ebenfalls nicht automatisiert werden können.

Unter der Voraussetzung, dass man sich auf Teilbereiche beschränkt, die durch ein mathematisches Modell beschrieben werden können und die zusätzlich einen Großteil des Entwurfsvolumens einnehmen, ist eine Entwurfsoptimierung dennoch durchführbar.

Wie später gezeigt werden wird, kann man bei vielen modernen Bürobauten ein bestimmtes Entwurfsmuster erkennen. Hierbei werden rechteckige Baukörper, welche die eigentlichen Büroflächen enthalten, zu einer Gesamtstruktur zusammengefügt. Diese Gesamtstruktur ist bei jedem Bauwerk individuell ausgeprägt, jedoch sind die Bürobaukörper (Grundmodule) bei allen Projekten ähnlich ausgeführt. Das bedeutet, dass hier ein Entwurfsbereich vorliegt, bei dem eine Optimierung sinnvoll durchgeführt werden kann. Hinzu kommt noch, dass diese Grundmodule bei Bürobauten den Großteil des Bauvolumens bestimmen. Somit kann eine Optimierung der Teilbereiche einen wesentlichen Beitrag zur Qualität des Gesamtentwurfs leisten.

Die in dieser Arbeit entwickelte Methode ist als Ansatz zu verstehen, den Planungsprozess zu beschleunigen, die Entwurfsentscheidungen mit Hilfe umfangreicher Daten zu unterstützen und somit Planungssicherheit zu gewährleisten.

### 2.2 Modellanforderungen

Zur Realisierung einer Bauaufgabe sind eine Vielzahl von einzelnen Baumaßnahmen zu koordinieren, deren "Optimierung" Ziel aller Planungs- und Ausführungsbeteiligten ist. Aus den unterschiedlichen Zielsetzungen der einzelnen Beteiligten ergeben sich jedoch Zwangspunkte und teilweise nicht zu vereinbarende Zielvorstellungen. Aufgabe des Architekten ist es, eine Lösung dieser Aufgabe zu entwickeln, die den Zielvorstellungen des Bauherrn entspricht und die Randbedingungen weitestgehend einhält.

Infolge der fortschreitenden technischen Entwicklung und der zunehmenden Komplexität der Bauaufgaben können alle Ziele und Randbedingungen nicht mehr alleine von den Architekten erkannt und zu einem Lösungskonzept zusammengefasst werden. Trotzdem lässt sich beobachten, dass der Planungsprozess in vielen Fällen linear verläuft, d. h. dass die Architekten wie bisher Entwurfsvarianten entwickeln und mit den Bauherren eine Variante festlegen, die dann zur Ausführung gebracht werden soll. Die entsprechenden Fachplaner werden nach dieser Entscheidung hinzugezogen und bearbeiten das Projekt, ohne grundlegende Entwurfsentscheidungen beeinflussen zu können. So kann es beispielsweise dazu kommen, dass komplizierte und teure Lösungen entstehen.

Das lineare Planungsverfahren hat jedoch den Vorteil, dass durch die fehlende Rückkopplung und Überprüfung aller Randbedingungen und Ziele schnell eine Lösung für die gestellte Bauaufgabe gefunden wird. Planungsverzögerungen infolge Entwurfsänderungen treten nur in geringem Maße auf. Da die Planungsgeschwindigkeit zunehmend an Bedeutung gewinnt, ist die Schnelligkeit ein wesentlicher Aspekt bei der Modellentwicklung.

Bei einer schnellen Planung bleibt allerdings wenig Zeit, alternative Lösungsvarianten zu entwickeln und miteinander zu vergleichen. Weil alternative Lösungsvarianten unzureichend vorhan-

den sind, wird eine Lösung gebaut, die aus der Erfahrung und aus intuitiven Entscheidungen der Planer heraus entworfen wurde. Aus diesem Grund sind die ganzheitliche, systematische Erfassung aller Parameter und Einflüsse sowie die Variantenbildung weitere Gesichtspunkte für die Modellentwicklung.

Das wichtigste Kriterium jeder Bauaufgabe und jeder Entwurflösung ist momentan die Kostensicherheit. Zur Gewährleistung der Kostensicherheit wird eine Kostenkontrolle im Bauablauf eingeführt. In Abbildung 2-1 [37] ist der Grad der Kostenbeeinflussbarkeit in Abhängigkeit der Projektdauer dargestellt. Es ist erkennbar, dass am Anfang eines Projekts der größte Einfluss auf die Kosten erzielt wird, und dass mit Beginn der Ausschreibung und Vergabe nur noch maximal 25% der Kosten beeinflusst werden können. Daher muss das Modell für eine größtmögliche Kostensicherheit bereits in der Vorplanung eingesetzt werden. Aus diesem Grund ist die Forderung nach einer einfachen und schnellen Anwendung des Modells sehr wichtig.

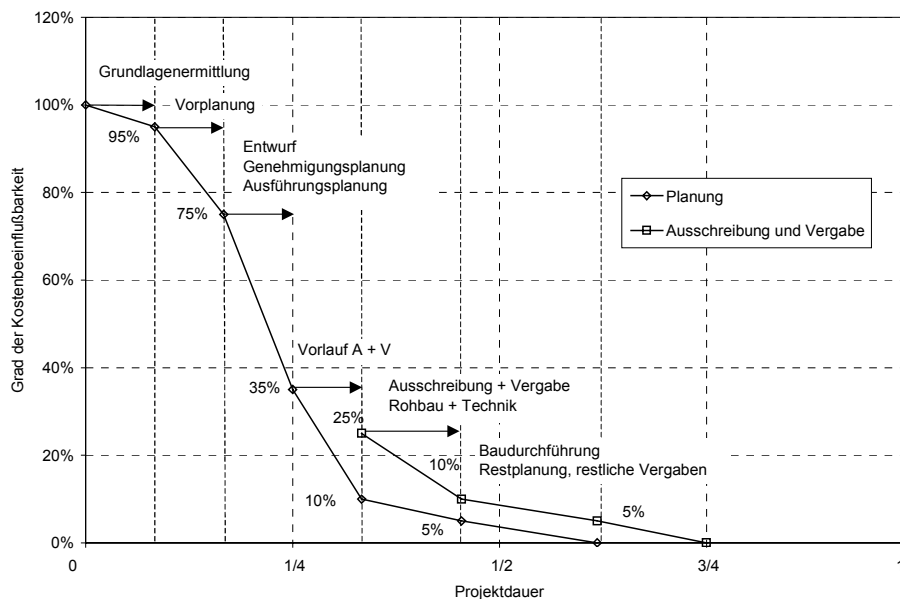


Abbildung 2-1: Kostenbeeinflussbarkeit in Abhängigkeit der Projektdauer [37]

Um die Komplexität einer Bauaufgabe im Modell zu erfassen, sollen alle Entwurfsparameter definiert und deren Abhängigkeiten formuliert werden. Wie bereits gesagt, sind für die Durchführung einer Optimierung objektive und messbare Kriterien notwendig. Da sich diese Kriterien verändern können, verschiedene Kriterienkombinationen möglich sein sollen und neue zukünftige Kriterien ergänzt werden sollen, ist ein modularer und flexibler Ansatz im Modell erforderlich, der dieser Anforderung genügt.

Für die Verallgemeinerung ist ein Basismodell der Entwurfsoptimierung notwendig, welches durch entsprechende Ergänzungen für verschiedene Anwendungen verwendbar ist.

Neben der Entwurfsoptimierung sind Einzelberechnungen erforderlich. Dabei werden im Gegensatz zur Optimierung die Variablen manuell vorgegeben bzw. verändert. Durch vergleichende Untersuchungen können die Auswirkungen einzelner Parameteränderungen auf den Entwurf berechnet und die verschiedenen Ergebnisse im Gesamtzusammenhang bewertet werden. Zur Bewertung sollen die Daten der verschiedenen Ergebnisse gespeichert und die Kriterien übersichtlich dargestellt werden.

Damit zukünftige Entwicklungen berücksichtigt und ergänzt werden können und damit Veränderungen bestehender Teile leicht vorzunehmen sind, soll das Modell modular aufgebaut werden.

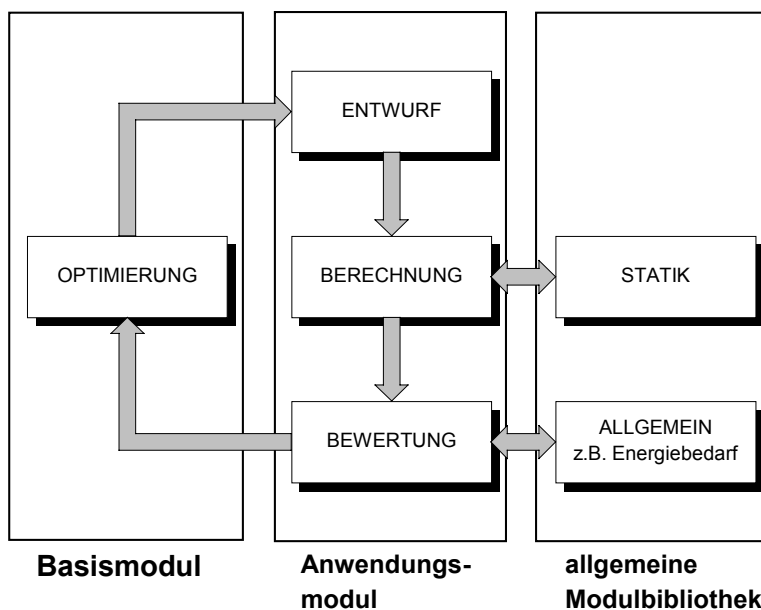
Die beschriebenen Anforderungen sind in nachfolgender Tabelle noch einmal zusammengefasst.

1	Vollständige mathematische Beschreibung
2	Einfachheit der Bedienung
3	hohe Berechnungsgeschwindigkeit (Optimierung, Einzelberechnung)
4	Transparenz der Ergebnisdarstellung
5	Modularität
6	Flexibilität der Beurteilungskriterien

*Tabelle 2-1: Modellanforderungen*

## 2.3 Modellstruktur

Die Modellstruktur ist im wesentlichen dreigeteilt. Der erste Teil besteht aus dem allgemeingültigen Optimierungsmodul. Der zweite Teil ist von der Entwurfsaufgabe abhängig und gliedert sich in drei Unterabschnitte, den Entwurf, die Berechnung und die Bewertung. Der dritte Teil ist flexibel erweiterbar und enthält die für die Entwurfsberechnung notwendigen statischen Module sowie allgemeingültige Module zur Berechnung der Kriterienwerte für die Beurteilung. Die prinzipielle Struktur ist in Abbildung 2-2 dargestellt.



*Abbildung 2-2: Prinzipielle Modellstruktur*

### 2.3.1 Optimierungsmodul

In diesem Modul soll die eigentliche Optimierung durchgeführt werden. Dazu wird aus den Berechnungsergebnissen in Bezug auf die vorgegebenen Kriterien für jede Entwurfslösung eine Qualität bestimmt. Die Maximierung dieser Qualität ist das Ziel der Optimierung. Aus der jeweiligen Qualität werden mit Hilfe eines bestimmten Verfahrens Veränderungen an den Optimierungsvariablen vorgenommen und die Berechnung wiederholt. Die Optimierung soll abgebrochen werden, wenn keine deutliche Verbesserung mehr erreicht wird. Die Bestimmung der Qualität einer Entwurfslösung soll von der Anzahl der verwendeten Kriterien unabhängig sein. Die Entwicklung dieses Moduls wird nachfolgend genau hergeleitet.

### 2.3.2 *Entwurf*

In diesem Modul sollen, bezogen auf eine definierte Aufgabenstellung, alle notwendigen Parameter vollständig definiert und die jeweiligen Wertebereiche festgelegt werden. Darüber hinaus sollen die Verknüpfungen und Abhängigkeiten untereinander formuliert werden. Diese systematische Erfassung ist eine Grundvoraussetzung für die weitere Modulentwicklung. Im Zusammenhang mit der Definition der Parameter wird eine Einteilung in feste und freie Parameter vorgenommen. Unter festen Parameter werden diejenigen verstanden, die zwingend vorgegeben werden müssen und nicht verändert werden dürfen. So ist z. B. die Auswahl des Bürotyps eine feste Variable, die vom Bauherrn festgelegt wird. Im Gegensatz dazu können freie Variablen im Optimierungsprozess innerhalb vorgegebener Grenzen verändert werden.

### 2.3.3 *Berechnung*

Mit Hilfe des Berechnungsmoduls sollen die Entwurfsgeometrie sowie die gewählten Tragstruktur berechnet werden. Die Berechnung der Tragstruktur erfolgt über eine Verknüpfung mit dem allgemeinen Statikmodul. Als Ergebnis werden die genauen geometrischen Abmessungen, Flächen und Rauminhalte sowie die erforderlichen Querschnitte und Massen der Tragkonstruktion ermittelt.

### 2.3.4 *Beurteilung*

Aus der Geometrie und den Massen werden alle für die Beurteilung notwendigen bzw. definierten Kriterien berechnet. Die Definition der Kriterien ist individuell von der jeweiligen Aufgabe abhängig. Die Berechnung der Kriterien kann sowohl in Abhängigkeit der Entwurfsaufgabe als auch unabhängig davon erfolgen. Aus diesem Grund ist eine Verknüpfung mit den entsprechenden Bausteinen des allgemeinen Moduls notwendig.

### 2.3.5 *Allgemeine Module*

Prinzipiell werden in diesem Modul alle von der Entwurfsaufgabe unabhängigen, aber für die Berechnung und für die Kriterien wichtigen Bausteine zusammengefasst. Damit wird eine allgemein für weitere Anwendungen verwendbare Sammlung begonnen.

Die wichtigsten Bausteine sind unter dem Begriff Statikmodul zusammengefasst. Hierbei handelt es sich um einzelne Programme (Decke, Träger, Stütze, Fundament), mit deren Hilfe die Tragstruktur der Entwurfslösung berechnet wird. Bei den Einzelprogrammen ist darauf zu achten, dass automatisch aus dem System und den Belastungen ein erforderlicher Querschnitt berechnet wird.

Weitere Module sind beispielsweise die allgemeine Berechnung des jährlichen Heizwärmebedarfs und des jährlichen Kunstlichtstrombedarfs (siehe Kapitel 6).



### 3 Entwurfsoptimierung

#### 3.1 Definition

Jeder Entwurf für ein Bauwerk, sei es für ein Einfamilienhaus, für ein großes Verwaltungsgebäude, für eine Brücke, für ein Tunnelbauwerk etc., durchläuft verschiedene Entwurfsstadien, in denen jeweils mehrere Alternativen entsprechend den Anforderungen und Randbedingungen entwickelt und untersucht werden. In jedem Entwurfsstadium werden Entscheidungen getroffen, wie die nächsten Schritte im Entwurfsprozess vorgenommen werden. Diese einzelnen Arbeitsschritte führen am Schluss zu einem Gesamtentwurf. Diese Art und Weise zu entwerfen entspricht dem einfachsten Optimierungsverfahren, dem "Trial and Error" -Verfahren. Dabei wird in jedem Stadium versucht, bessere Alternativen als die vorhandenen zu finden. Die beste Alternative wird weiter bearbeitet, und die schlechteren Alternativen werden verworfen.

Aus diesen Überlegungen heraus lässt sich der Begriff der Entwurfsoptimierung folgendermaßen definieren:

Unter Entwurfsoptimierung wird ein Optimierungsverfahren verstanden, welches das übliche manuelle "Trial and Error" -Verfahren systematisiert und gezielt Entwurfsalternativen berechnet, welche die vorgegebenen Randbedingungen bestmöglich erfüllen.

#### 3.2 Grundprinzip der Optimierung

In vielen Bereichen der Wirtschaft und des Ingenieurwesens wird von Optimierung gesprochen, und Optimierungsmodelle werden eingesetzt. In jedem Fall wird unter dem Vorgang der Optimierung ein Verfahren verstanden, das unter Berücksichtigung verschiedener Randbedingungen und Zielvorstellungen eine Lösung findet, die allen Anforderungen bestmöglich, "optimal" entspricht.

Allgemein kann man ein Optimierungsproblem in der folgenden mathematischen Form darstellen.

minimiere (maximiere)	$f : R^n \rightarrow R,$
ggf. mit Restriktionen	$g_i \geq 0, i = 1, \dots, m;$
gesucht	$\underline{x}^* \in R^n,$
so dass gilt	$\forall \underline{x} \in R^n : f(\underline{x}^*) \leq f(\underline{x})$
und ggf.	$g_i(\underline{x}^*) \geq 0, i = 1, \dots, m$

### 3.3 Optimierungsverfahren

In der Literatur werden viele verschiedene Optimierungsverfahren beschrieben, die für unterschiedliche Anwendungen entwickelt bzw. überarbeitet wurden. Es soll hier jedoch nur ein kurzer Überblick über die Verfahren gegeben und deren wesentliche Vor- und Nachteile diskutiert werden.

Die wichtigsten Verfahren sind:

- Lineare Optimierung / Lineare Programmierung
- Nichtlineare Optimierung / mathematische Programmierung
- Ganzzahlige Optimierung.

#### 3.3.1 Lineare Optimierung

Lineare Optimierungsverfahren zeichnen sich dadurch aus, dass die Variablen in der Zielfunktion und in den Nebenbedingungen, die grundsätzlich algebraische Gleichungen sind, ausschließlich linear vorkommen. Die Nebenbedingungen können Gleichheits- und Ungleichheitsbedingungen sein. Die Zielfunktion kann sowohl minimiert als auch maximiert werden. Die Lösung einer solchen Optimierungsaufgabe kann mit Hilfe des Simplex-Algorithmus erfolgen. Treten diskrete Variablen im Optimierungsproblem auf, dann kann der Simplex-Algorithmus nicht mehr angewendet werden. Die lineare Optimierung ist ein ausgefeiltes Verfahren, welches in vielen verschiedenen Situationen getestet und erfolgreich angewendet wurde. Der Nachteil dabei ist, dass dieses Verfahren nur unter der strengen Linearität funktioniert. Das heißt, dass Probleme mit nichtlinearen Variablen nicht gelöst werden können.

#### 3.3.2 Nichtlineare Optimierung

Die nichtlineare Optimierung beschäftigt sich mit der Berechnung von Extremwerten nichtlinearer Funktionen. Die notwendigen Ungleichheits- und Gleichheitsbedingungen können ebenfalls nichtlinear sein. Damit dieses Verfahren eingesetzt werden kann, müssen die Zielfunktion und die Nebenbedingungen sowohl stetig als auch bereichsweise differenzierbar sein.

Es existieren drei Klassen von Verfahren, die entsprechend ihrer Anforderungen an die Zielfunktion und deren Ableitungen unterschieden werden:

- Direkte Verfahren  
Bei den direkten Verfahren wird von einem Startpunkt ausgehend eine Schrittweite ohne weitere Information bezüglich der Funktion und ihrer Ableitungen bestimmt.
- Gradienten-Verfahren  
Hier wird neben dem Funktionswert die erste partielle Ableitung der Zielfunktion am betrachteten Punkt zur Festlegung der Schrittweite bestimmt. Die Suchrichtung orientiert sich am steilsten An- bzw. Abstieg der Funktion.
- Newton-Verfahren  
Das Newtonverfahren benutzt neben der ersten partiellen Ableitung auch die zweite Ableitung, wie bei analytischen Verfahren.

Diese Verfahren haben den Nachteil, dass sie nur unter der Bedingung stetiger und differenzierbarer Variablen eingesetzt werden können. Bei diskreten Variablen sind diese Verfahren nicht mehr einsetzbar. Auch sind bei diesen Verfahren Änderungen der Variablenanzahl, der Zielfunktion etc. nur schwer durchzuführen. Das bedeutet, dass diese Verfahren nur in einem geringen Maß flexibel und erweiterbar sind.

### 3.3.3 Ganzzahlige Optimierung

Die Lösung einer Optimierungsaufgabe mit diskreten Variablen ist außerordentlich schwierig, da die Variablen weder stetig noch linear sind. Ein allgemeingültig anwendbarer Algorithmus existiert zur Zeit nicht. Es gibt jedoch einige Verfahren, mit denen eine ganzzahlige Optimierung durchgeführt werden kann.

- Schnittebenenverfahren
- Entscheidungsbaumverfahren
- stochastische Suchmethoden
- Monte Carlo Verfahren
- Evolutionäre Algorithmen.

Bei einigen Aufgabenstellungen treten sowohl reelle als auch ganzzahlige Variablen auf. In diesem Fall spricht man von gemischt ganzzahligen Optimierungsaufgaben. Solche Aufgabenstellungen lassen sich nur noch experimentell mit Hilfe von stochastischen Suchmethoden lösen. Vertreter dieser Methoden sind u. a. die evolutionären Algorithmen, wozu die Evolutionsstrategien und die genetischen Algorithmen gehören.

### 3.4 Anforderungen an ein Optimierungsverfahren

Ein Großteil der im Entwurfsprozess verwendeten Parameter wie Raumanzahl, Trennwandsystem, Stützenstellungen, Profilquerschnitte etc. sind keine reellen sondern diskrete Variablen. Zusätzlich zu dem Problem der diskreten Variablen kommt noch die Forderung nach Flexibilität, Erweiterbarkeit und Unabhängigkeit von der Variablenanzahl sowie die Forderung nach Verwendung unterschiedlicher Variablentypen. Neben den diskreten sind digitale (0 - 1) und reelle Variablen für die Modellierung eines Gebäudeentwurfs notwendig.

Um die Einflüsse verschiedener Kriterien zu untersuchen, ist ein Verfahren notwendig, bei dem die Zielfunktion flexibel erweiterbar bzw. veränderbar ist. Anschaulich bedeutet das, dass eine Optimierung beispielsweise nach zwei, drei oder mehr Kriterien und in beliebigen Kombinationen durchführbar ist, ohne dass der grundlegende Algorithmus verändert werden muss.

Durch die gleichzeitige Verwendung von mehr Kriterien handelt es sich hierbei um ein multimodales Problem.

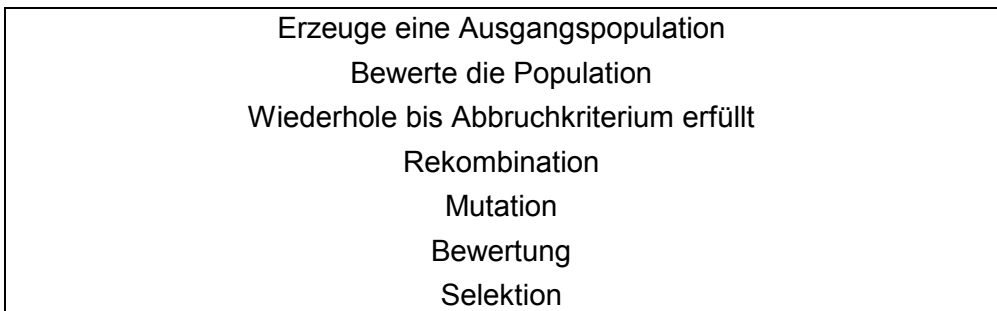
Zur Untersuchung der Auswirkung einzelner Variablen auf das Ergebnis soll die Variablenanzahl steuerbar sein. Es soll die Möglichkeit bestehen, Variablen aus dem Optimierungsprozess auszuschließen und den Variablenwert manuell einzugeben.

### 3.5 Auswahl eines Optimierungsverfahrens

Es sind bereits viele Optimierungsverfahren entwickelt worden, die alle auf iterativem Weg das Optimum finden wollen. Die klassischen Optimierungsverfahren wie beispielsweise das Gradientenverfahren haben den entscheidenden Nachteil, dass bei multimodalen Problemen und unstetigen Zielfunktionen nicht mehr problemlos anwendbar sind. Hinzu kommt noch die Schwierigkeit, dass bei solchen Verfahren die Anzahl der Optimierungsziele und der Randbedingungen nur mit hohem Aufwand und einer Überarbeitung des Verfahrens geändert werden können. Der Einsatz von verschiedenen Variablentypen ist ebenfalls problematisch. Somit scheiden solche Verfahren für eine Entwurfsoptimierung aus.

Für Probleme mit veränderlichen Zielen und Randbedingungen sowie mit verschiedenen Variablentypen, insbesondere bei diskreten Variablen, eignen sich am besten evolutionäre Algorithmen. Allgemein sind evolutionäre Algorithmen zufallsorientierte mathematische Verfahren, die sich aus der biologischen Evolutionstheorie ableiten. Es gibt im wesentlichen zwei verschiedene Verfahren: die Evolutionsstrategien (ES) und die genetischen Algorithmen (GA). Die ES basieren auf einem Modell, das in den sechziger Jahren von I. Rechenberg [71],[80],[81] an der

TU Berlin entwickelt wurde. Gleichzeitig, jedoch unabhängig von I. Rechenberg, wurden von J. Holland in den USA die GA entwickelt [26],[27]. Interessant ist, dass der prinzipielle Ablauf bei beiden Verfahren gleich ist.



*Abbildung 3-1: Prinzipielles Ablaufschema evolutionärer Algorithmen*

Dennoch unterscheiden sich beide Verfahren. Die Evolutionsstrategien verfolgen einen an Realzahlen orientierten Codierungsansatz. Sie gehen nicht auf die Genstruktur oder eine detaillierte Chromosomencodierung der Individuen ein. Die genetischen Algorithmen dagegen verwenden eine binäre Codierung der Parameter.

Bei den Evolutionsstrategien stehen Mutationsprozesse und die adaptive Schrittweitenregelung im Vordergrund, bei den genetischen Algorithmen hingegen eher die genetische Rekombination und die Crossover-Mechanismen.

Der in [79] durchgeführte Vergleich beider Verfahren führt zu keinem eindeutigen Ergebnis, welches Verfahren besser ist und bei welcher Art von Problemen welches Verfahren einzusetzen ist. Lediglich die Art der Variablen und die Problemstellung geben einen Hinweis, welches Verfahren eventuell besser geeignet ist. So sind für Probleme, die im wesentlichen mit reellzahligen Variablen zusammenhängen, die Evolutionsstrategien und bei diskreten Problemen genetische Algorithmen vorzuziehen. Bei der Verwendung von verschiedenen Variablentypen haben die genetischen Algorithmen durch die einheitliche Codierungsform Vorteile gegenüber den Evolutionsstrategien.

Aus diesen Gründen wird die Optimierungsaufgabe in dieser Arbeit mit Hilfe der genetischen Algorithmen als Grundverfahren gelöst.

### 3.6 Genetische Algorithmen

Die genetischen Algorithmen (im folgenden GA genannt) wurden von J. Holland in den USA entwickelt. Dabei standen vorwiegend die informationstheoretischen Aspekte der Evolution im Vordergrund, nämlich das Problem, wie durch genetische Mechanismen Informationen gewonnen, verarbeitet, ausgewertet, zerstört und von Generation zu Generation ohne größere Fehler weitergereicht werden können. Holland hat jedoch erkannt, dass sich die GA zur Lösung komplexer Optimierungsprobleme eignen [79]. In den folgenden Kapiteln werden die Grundsätze der GA kurz erläutert. Für umfassendere und detailliertere Erklärungen sei auf die Literatur verwiesen.

#### 3.6.1 Der Pseudocode eines GA

Das Grundprinzip eines GA lässt sich am besten mit Hilfe eines Pseudocodes beschreiben. Hierbei werden die einzelnen Schritte in Abhängigkeit der Arbeitsweise eines GA erläutert.

##### PSEUDOCODE EINES GENETISCHEN ALGORITHMUS

Wähle eine geeignete Codierung der Chromosomen

Initialisiere zufällig eine Population von Chromosomen und nenne die Ausgangspopulation Generation 0

Wiederhole bis Bewertung bzw. Fitness zufriedenstellend oder bis Abbruchkriterium (z. B. Generation  $\geq 1000$ ) erreicht ist

Bewerte alle Elemente der aktuellen Generation gemäß Bewertungs- und/oder Fitnessfunktion  
Selektiere Paare (oder größere Subpopulationen) gemäß einem Heiratsschema und erzeuge mittels Rekombination (Crossover) Nachkommen der aktuellen Generation

Mutiere die Nachkommen

Ersetze Elemente der aktuellen Generation durch die Nachkommen gemäß Ersetzungsschema und erzeuge so eine neue Generation

Aktualisiere die Abbruchbedingung

Abbildung 3-2: Pseudocode eines GA [79]

Die einzelnen Algorithmen unterscheiden sich durch die Ausbildung und Arbeitsweise der verschiedenen Teilbereiche (Codierung, Fitness- Bewertungsfunktion, Crossover, Mutation, Heiratsschema, Ersetzungsschema). Auf diese Einzelbausteine eines GA wird nun in den folgenden Kapiteln näher eingegangen.

#### 3.6.2 Codierung

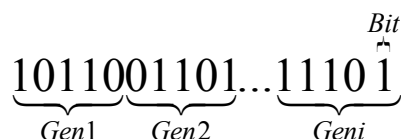


Abbildung 3-3: Beispiel für ein Chromosom mit  $i$ -Genen und  $n$ -Bits.

Die Codierung eines GA wandelt alle notwendigen Parameter in ein Chromosom um, welches den Grundbaustein des GA bildet und entsprechend im Algorithmus verwendet wird. Das Chromosom besteht aus einer endlichen Anzahl  $\geq 1$  von Genen (Variablen), die wiederum aus

einer endlichen Zahl von Bits bestehen. Bei der Definition der Ausprägungen eines Bits hat sich der sogenannte Binärcode durchgesetzt. Das bedeutet, dass ein Bit nur den Wert 1 oder 0 annehmen kann. Somit kann ein Chromosom als Vektor definiert werden, der aus  $n$  Bits  $\in \{0,1\}$  besteht.

Die Vorteile der binären Codierung liegen in der einfachen Umsetzung in eine Software und in dem geringen Speicherplatzbedarf. Bei einer Codierung von reellen Zahlen hingegen werden mehrere Gene oder eine größere Anzahl von Bits benötigt, so dass der Vorteil geringen Speicherplatzes durch die erhöhte Zahl von Genen verloren geht.

Die Codierung von reellen Zahlen wird im folgenden Beispiel erläutert. Ein Chromosom der Gestalt 10101, bestehend aus einem Gen mit fünf Bits, wird folgendermaßen in eine natürliche Zahl umgerechnet:

$$\begin{array}{rcccccc}
 2^4 & 2^3 & 2^2 & 2^1 & 2^0 & \\
 16 & 8 & 4 & 2 & 1 & \\
 \hline
 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & = 16 + 4 + 1 = 21
 \end{array}$$

*Abbildung 3-4: Beispiel Umrechnung Binärcode in eine natürliche Zahl*

Die berechnete Zahl 21 wird als Hilfsvariable eingeführt und für die Berechnung der reellzahligen Variable verwendet. Sei  $i$  die Anzahl der Bits und seien  $a, b$  die Bereichsgrenzen einer reellen Variable  $x \in [a, b]$  sowie  $Wert$  die Auswertung eines Chromosoms, dann berechnet sich der reelle Zahlenwert der Variable zu:

$$x = \frac{Wert \cdot (b - a)}{2^i - 1} + a \quad (Gl. 3-1)$$

Bei einem Gültigkeitsbereich von  $x \in [2,8]$  ergibt sich mit dem Gen 10101 die reelle Zahl  $x=6,0645$ . An Hand dieses Beispiels erkennt man eine prinzipielle Problematik der Binärcodierung im Zusammenhang mit reellen Zahlen. Die Codierung der Variable  $x$  wurde im obigen Beispiel durch 5 Bits vorgenommen. Durch die Umrechnung des Gens, bestehend aus 5 Bits, in eine natürliche Zahl ergeben sich genau 32 mögliche Werte. Im mathematischen Sinne existieren aber für  $x \in \mathbb{R}$  im Bereich  $x \in [2,8]$  unendlich viele Zahlen. Selbst wenn man die erforderliche Genauigkeit der Lösung mit einbezieht und beispielsweise eine Genauigkeit mit zwei Nachkommastellen fordert, sind immer noch 601 Zahlen möglich. Dies bedeutet für das obige Beispiel, dass die gewählte Codierung mit 5 Bits den Ergebnisraum nicht besonders gut beschreibt. Es ist also festzuhalten, dass die Codierung von reellen Zahlen mit einem Binärcode problematisch ist, wenngleich dadurch reelle Zahlen als Variablen in einem GA trotzdem möglich sind. Es kann jedoch allgemein gesagt werden, dass sogenannte Feinjustierungen von reellen Variablen mit GA nur sehr schwer möglich sind.

Ein weiteres Problem der Binärcodierung entsteht aus der Positionsabhängigkeit der Codierung. Abbildung 3-4 zeigt, dass jedem Bit in Abhängigkeit der Position  $i$  genau eine natürliche Zahl mit dem Wert  $2^{i-1}$  zugeordnet wird. Die Codierung der natürlichen Zahlen von 1 bis 8 im Standardbinärcode mit Hilfe von 4 Bits ergibt:

1	⇒	0001
2	⇒	0010
3	⇒	0011
4	⇒	0100
5	⇒	0101
6	⇒	0110
7	⇒	0111
8	⇒	1000

Beim Übergang von 7 nach 8 werden bei der Standardbinärcodierung alle vier Bits verändert. Das bedeutet, dass die kleine Änderung bei den natürlichen Zahlen eine große Änderung, nämlich aller vier Bits, bei der Binärcodierung nach sich zieht. Allgemein gesagt bedeutet das, dass kleine Änderungen in einer Codierungsform nicht automatisch zu kleinen Änderungen in einer anderen Codierungsform führen. Aus diesen Überlegungen heraus wurde der sogenannte Graycode entwickelt. Hierbei wird beim Übergang im Dezimalcode von  $n$  nach  $n+1$  im Graycode nur ein Bit verändert.

	Binärcode	Graycode		Binärcode	Graycode
0	00000	00000	7	00111	00100
1	00001	00001	8	01000	01100
2	00010	00011	9	01001	01101
3	00011	00010	10	01010	01111
4	00100	00110	11	01011	01110
5	00101	00111	12	01100	01010
6	00110	00101	13	01101	01011

Tabelle 3-1: Vergleich Dezimal-, Binär- und Graycode

Aufgrund dieser Probleme mit dem Standardbinärcode ist der Graycode bei vielen praktischen und theoretischen Problemen dem gewöhnlichen Binärcode vorzuziehen.

### 3.6.3 Fitness- und Bewertungsfunktion

Während bei den Evolutionsstrategien kein Unterschied zwischen Bewertungs- und Fitnessfunktion besteht, so sind diese Funktionen bei den genetischen Algorithmen zu unterscheiden. Die Bewertungsfunktion beschreibt die Güte eines Individuums und ist das eigentliche Optimierungskriterium. Hinsichtlich der Art der Funktion müssen keine besonderen Anforderungen erfüllt werden. Selbst das Prinzip der strengen Kausalität von Rechenberg, d. h. geringfügige Veränderung eines Chromosoms darf nur eine geringfügige Veränderung der Bewertung zur Folge haben, muss meist nicht beachtet werden. Die einfachste Bewertungsfunktion ist die Addition der einzelnen Kriterien zu einer Gesamtbewertungszahl. Im folgenden sei  $B_i$  die Bewertung eines Gens  $i$ ,  $n$  die Gesamtanzahl der Gene und  $B$  die Gesamtbewertung eines Individuums.

$$B = \sum_{i=1}^n B_i \quad (Gl. 3-2)$$

Die Fitnessfunktion ist im allgemeinen eine Umrechnung der Bewertungsfunktion. Diese wird verwendet, um aus der Bewertung eines Individuums die Wahrscheinlichkeit, Fitness, für eine Rekombination in der nächsten Generation zu errechnen. Im einfachsten Fall wird die Fitnessfunktion gleich der Bewertungsfunktion gesetzt.

### 3.6.4 Crossover/Rekombination

Die Crossover-Verfahren haben bei den GA eine zentrale Bedeutung. Durch gezielte Crossover-Verfahren soll der Suchraum effizient durchschritten und die Regionen mit höherer durchschnittlicher Güte sollen schneller erreicht werden. Durch geeignete Crossover-Verfahren kann ein GA ohne Veränderung des prinzipiellen Algorithmus an die jeweilige Problemstellung angepasst werden.

In der Literatur werden im allgemeinen drei grundlegende Crossover-Verfahren genannt:

One-Point-Crossover      n-Point-Crossover      Zufallsschablone

Alle drei Verfahren erzeugen aus einem Ausgangspaar eine neues Paar von Chromosomen. Die einfachste Form eines Crossover-Verfahrens ist der One-Point-Crossover. Hierbei wird eine natürliche Zufallszahl zwischen 1 und der Länge des Chromosoms generiert. Das neue Chromosomenpaar wird dadurch gebildet, dass die Bitstrings bis zu dem durch die Zufallszahl gewählten Bit gleich bleiben und die Bitstrings danach vertauscht werden.

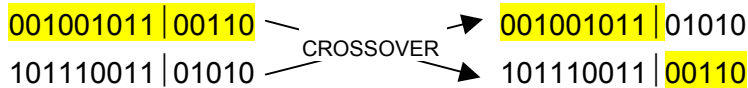


Abbildung 3-5: Schema eines One-Point-Crossover

Ein n-Point-Crossover funktioniert genau wie ein One-Point-Crossover, jedoch werden dabei n Zufallszahlen generiert und das gewählte Chromosomenpaar wird abwechselnd wieder zusammengesetzt. Ein Schema für ein n-Point-Crossover ist in der folgenden Abbildung dargestellt.



Abbildung 3-6: Schema eines n-Point-Crossover

Das Crossover-Verfahren mit Zufallsschablone generiert einen Zufallsvektor  $z$  mit der Länge der Chromosomen. Das neue Chromosomenpaar wird nun dadurch gebildet, dass die Bits der neuen Chromosomen in Abhängigkeit des Zufallsvektors gebildet werden. Ist  $z_i=1$ , dann ist das neue Bit gleich dem alten Bit des ersten Ausgangschromosoms, im anderen Fall gleich dem alten Bit des zweiten Ausgangschromosoms. Das zweite neue Chromosom entsteht durch bitweises Invertieren des ersten neuen Chromosoms.

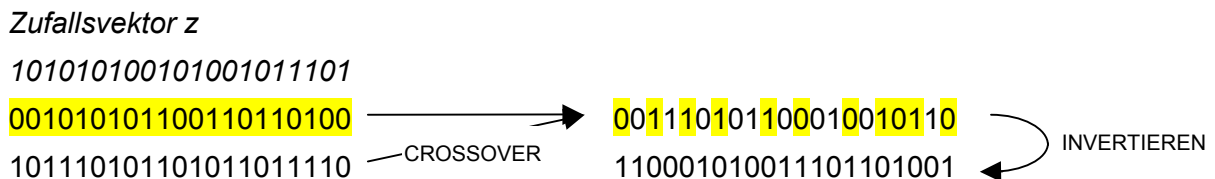


Abbildung 3-7: Schema eines Crossover mit Zufallsschablone

Zu diesen oben beschriebenen Verfahren werden in der Literatur viele weitere Verfahren beschrieben, die an dieser Stelle nicht weiter aufgeführt werden sollen.

### 3.6.5 Mutation

Die Mutation nimmt in einem GA eine weniger wichtige Stellung ein als die Crossover-Verfahren, dennoch darf sie nicht unterbewertet oder sogar vergessen werden. Der eigentliche Zweck der Mutation besteht darin, vorzeitige Konvergenzen des Algorithmus zu verhindern und für eine gewisse Inhomogenität innerhalb der Population zu sorgen. Infolge der Selektion und der Rekombination werden die Populationen im Laufe der Generationen immer homogener, d. h. dass bei sehr homogenen Populationen kaum eine Verbesserung einzelner Individuen durch ein Crossover-Verfahren erzielt werden kann. Durch geeignete Mutationsverfahren wird die homogene Population aufgebrochen, und es werden eventuell neue und bessere Individuen erzeugt. Bildlich kann man diesen Vorgang als ein Springen einzelner Individuen aus der Masse beschreiben, indem man annimmt, dass die breite Masse der Population einem kleinen Berg (lokales Extremum) zustrebt und infolge der Mutation manche Individuen auf den Hang eines anderen, vielleicht auch höheren Berges, springen und somit der Masse neue und bessere Ziele aufzeigen.



Die Standardmutation ist eine gleich verteilte Mutation, bei der jedes Bit die gleiche Chance auf eine Mutation hat. Im Falle einer Mutation wird das entsprechende Bit invertiert, d.h. dass bei einer Binärcodierung die "0" in eine "1" und die "1" in eine "0" umgetauscht wird.

Wie im Kapitel Codierung bereits diskutiert, haben manche Bits in Abhängigkeit ihrer Position eine andere Wertigkeit. Dies kann durch die Wahl einer sogenannten Positionsmutation berücksichtigt werden. Hier wird für jedes Bit eine individuelle Mutationswahrscheinlichkeit festgelegt.

Wie bei den Crossover - Verfahren gibt es auch bei den Mutationsverfahren unzählige Veröffentlichungen, auf die hier nicht näher eingegangen werden soll.

### 3.6.6 Heiratsschema/Selektion

Das Heiratsschema legt fest, aus welchen Elternpaaren neue Nachkommen erzeugt werden. Es werden üblicherweise aus zwei Eltern wieder zwei Nachkommen erzeugt. Jedoch ist es auch möglich, eine nicht der biologischen Evolution entsprechende Fortpflanzung derart zu wählen, dass aus einem Elter zwei Nachkommen entstehen, oder dass aus drei oder mehr Eltern verschiedene Nachkommen erzeugt werden.

Beim klassischen GA werden die Eltern mit einer Wahrscheinlichkeit, die proportional zu ihrer Fitness ist, ausgewählt. So wird erreicht, dass die Individuen mit einem hohen Fitnesswert mit einer größeren Wahrscheinlichkeit zur Erzeugung von Nachkommen ausgewählt werden als Individuen mit einem niedrigen Fitnesswert, um so die Güte der Population über die Generationen hinweg kontinuierlich zu steigern. Dieses Verfahren wird in der Literatur als „Roulette-Wheel“ oder „Roulette-Verfahren“ bezeichnet. Wichtig ist in diesem Zusammenhang jedoch, dass schlechte Individuen ebenfalls eine Chance haben sich fortzupflanzen, jedoch mit einer geringeren Wahrscheinlichkeit.

Individuum	Fitnesswert	Wahrscheinlichkeit
1	30	9,68 %
2	10	3,23 %
3	30	9,68 %
4	30	9,68 %
5	20	6,45 %
6	20	6,45 %
7	20	6,45 %
8	50	16,13 %
9	80	25,81 %
10	20	6,45 %
	310	100,00 %

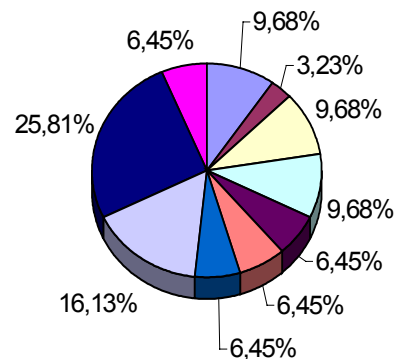


Abbildung 3-8: Beispiel „Roulette-Wheel“ Heiratsschema von 10 Individuen

Für die Auswahl eines Individuums zur Fortpflanzung werden die Wahrscheinlichkeiten aller Individuen auf einer Skala zwischen 0 und 1 aufgetragen.

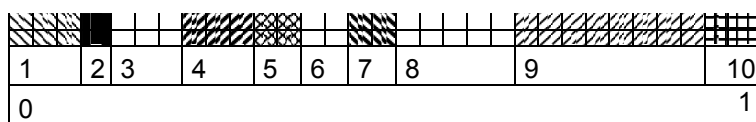


Abbildung 3-9: Intervalldarstellung der Individuen

Danach wird eine Zufallszahl zwischen "0" und "1" gewählt und dieser Punkt auf der Skala (vgl. Abbildung 3-9) angetragen. Das Individuum, in dessen Bereich die Zufallszahl liegt, wird für die Fortpflanzung ausgewählt.

### 3.6.7 Ersetzungsschema

Nachdem die einzelnen Kandidaten mit dem Heiratsschema für die Rekombination ausgewählt und die Nachkommen entsprechend erzeugt wurden, muss entschieden werden, welche Individuen in die nächste Generation übernommen werden. Allgemein gibt es folgende Ersetzungsschemata:

- General Replacement:  
Vollständiges Ersetzen der Elterngeneration durch die Nachkommen
- Elitismus:  
Die n besten Individuen einer Population werden unverändert in die nächste Generation übernommen
- Schwacher Elitismus:  
Die n besten Individuen einer Population werden in mutierter Form in die nächste Generation übernommen
- delete last n:  
Ersetze die n schlechtesten Individuen durch n Nachkommen

Diese oben genannten Ersetzungsschemata stellen nur einen kleinen Teil aller möglichen Verfahren dar. Eine gute Übersicht und Besprechung der Verfahren ist in [79] gegeben. Wichtig ist, daß durch die Wahl eines Ersetzungsschemas das betrachtete Optimierungsproblem beeinflusst werden kann.

## 3.7 Lösungsansatz

Die Basis des Lösungsansatzes für eine Entwurfsoptimierung bildet ein einfacher genetischer Algorithmus, der sogenannte „Single Genetic Algorithm“, im folgenden SGA genannt, wie er von D. Goldberg [26] veröffentlicht wurde. Hierbei wird für die Beschreibung der Variablen eine einfache Binärcodierung verwendet (siehe Kapitel 3.6.2). Weiterhin wird ein einfaches Crossover-Verfahren und eine Mutation durch bitweises Vertauschen von Werten eingesetzt.

Abbildung 3-10 zeigt den Ablauf des Ausgangsalgorithmus (SGA) von Goldberg.

Durch die Anwendung des SGA auf verschiedene Beispiele aus der Literatur sowie auf ein selbstgewähltes Beispiel, das dem zu lösenden Entwurfsoptimierungsproblem ähnlich ist, werden die Vor- und Nachteile dieses Algorithmus analysiert. Zur Verbesserung des SGA sind geeignete Veränderungen und Anpassungen notwendig, die in den folgenden Kapiteln beschrieben werden.

### 3.7.1 Codierung

Allgemein werden die Variablen als Bitstrings bestehend aus 10 einzelnen Bits codiert. Das bedeutet, dass jede Variable 1024 verschiedene Werte [0,..., 1023] annehmen kann. Bei diskreten Variablen, die 2, 3, 4 oder 5 verschiedene Ausprägungen annehmen können, wird die Menge der Möglichkeiten aufgeteilt. Bei zwei Ausprägungen werden die Variablenwerte von 0 bis 511 der ersten und die Werte von 512 bis 1023 der zweiten Ausprägung zugeordnet. Die Aufteilung verhält sich genau 50%/50%. Bei drei oder fünf Ausprägungen ergeben sich kleine Ungenauigkeiten, da sich 1024 nicht ohne Rest durch drei oder fünf teilen lässt. Bei drei Ausprägungen nimmt die erste Ausprägung die Werte von 0 bis 340  $\Rightarrow$  33,3%, die zweite Ausprägung die Werte von 341 bis 682  $\Rightarrow$  33,4% und die dritte Ausprägung die Werte von 683 bis 1023  $\Rightarrow$  33,3% an. Diese Ungenauigkeit hat für die Berechnung keinen weiteren Einfluss.

Bei reellen Variablen kann bei dieser Art der Codierung nicht das mathematisch korrekte Intervall von  $[a, \dots, b]$  mit unendlich vielen Zwischenwerten beschrieben werden. Diese Tatsache ist für die in dieser Arbeit untersuchte Entwurfsoptimierung von untergeordneter Bedeutung, da die reellzahligen Variablen einen maximalen Wertebereich von 0 bis 2,00 m aufweisen. Bei einer Genauigkeit von  $\pm 1$  cm im Bauwesen bedeutet das, dass diese Variablen 201 verschiedene Werte annehmen können. Somit ist eine Codierung dieser Variablen mit 10 Bits und der sich daraus ergebenden Menge von 1024 Ausprägungen ausreichend genau.

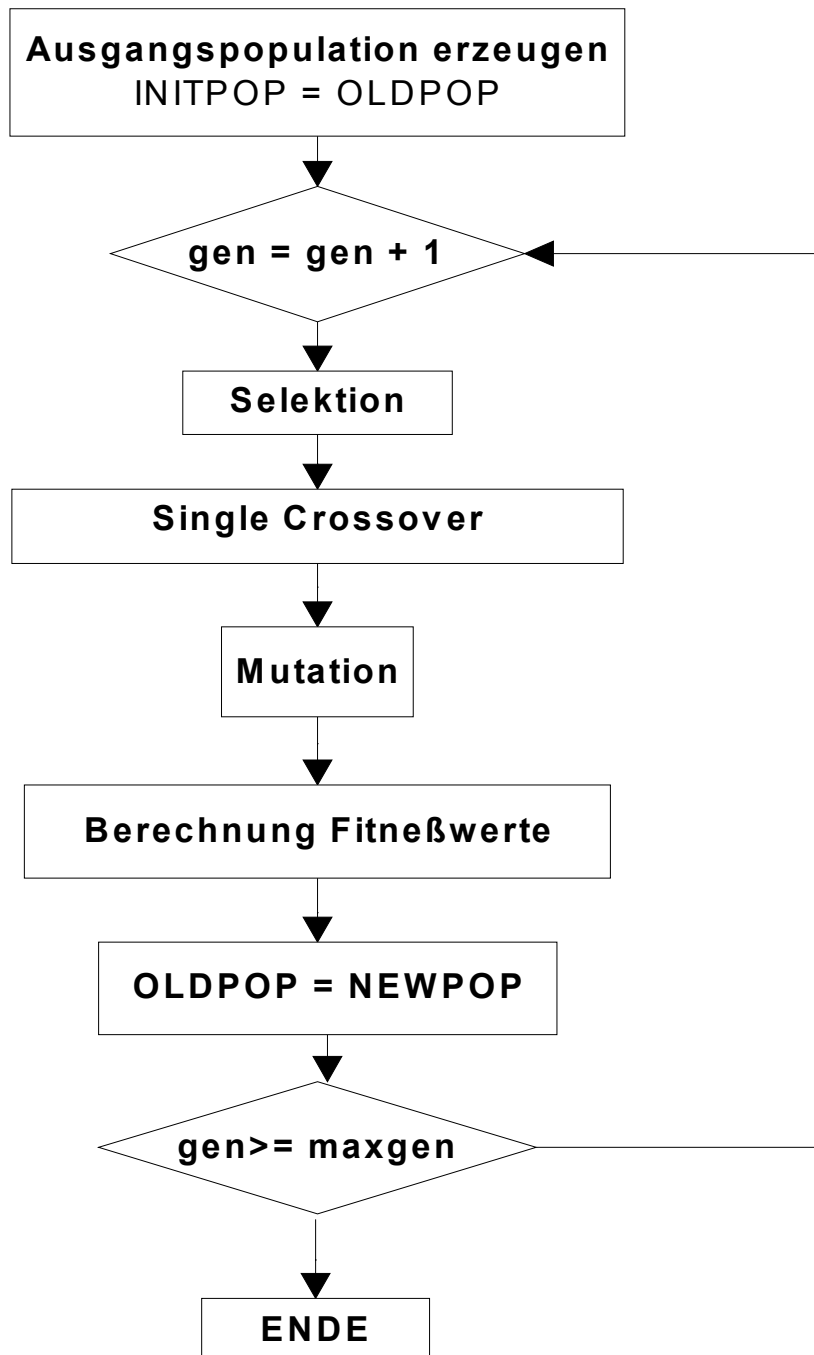


Abbildung 3-10: Flussdiagramm Single Genetic Algorithm nach D E. Goldberg [26]

### 3.7.2 Crossover

Ein einfacher Crossover, Single Crossover, wie in Kapitel 3.6.4 beschrieben, erscheint für das Problem nicht sinnvoll, da nur eine Variable in der gesamten Stringkette verändert werden kann. Wie später am Beispiel von Testfunktionen gezeigt wird, eignet sich ein n-Point-Crossover für Optimierungsprobleme mit n Variablen am besten. Zusätzlich zu den Festlegungen des Crossovermechanismus wird eine weitere Veränderung des grundlegenden Crossover-Verfahrens durchgeführt.

Der Grundgedanke des SGA geht davon aus, dass aus n Eltern wieder n Kinder entstehen. Das bedeutet, dass bei einer Population von popsize Individuen, unter der Voraussetzung, dass popsize gerade ist, auch wieder popsize Kinder entstehen. Da aus zwei Eltern jeweils zwei Kinder entstehen, findet der Crossover genau  $\text{popsize}/2$  mal statt. Die Crossover-Verfahren nehmen bei GA eine zentrale Stellung ein und sind für die Durchschreitung des Suchraums verantwortlich, so dass es logisch erscheint, einen Crossover so oft wie möglich durchzuführen.

Der Single Crossover nach Goldberg wird nun dahingehend abgeändert, dass insgesamt popsize mal ein Crossover durchgeführt wird und  $2 \cdot \text{popsize}$  Kinder entstehen.

Diese Veränderung leitet sofort in das nächste Kapitel über, denn durch die Erzeugung von doppelt so vielen Kinder wie Eltern muss eine Selektion getroffen werden, welche Individuen in die neue Population übernommen werden. Hierbei wird vorausgesetzt, dass sich die Größe der Population von Generation zu Generation nicht verändert.

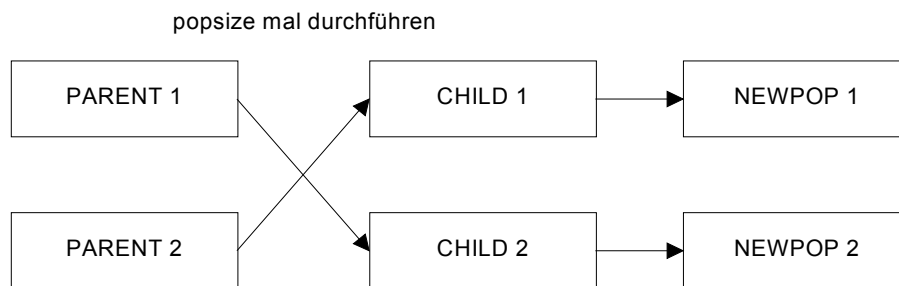


Abbildung 3-11: Single Crossover zur Erzeugung von  $2 \cdot \text{popsize}$  Kinder

### 3.7.3 Ersetzungsschema

Wie im vorangehenden Kapitel erläutert, ist ein Ersetzungsschema zu wählen, so dass die Größe der Population, die in die nächste Generation vererbt wird, konstant bleibt. Aus diesem Grund ist ein Auswahlverfahren notwendig, das aus allen Individuen aussucht, welche Kinder in die nächste Generation übergehen. Die von S. Jacobs [46] durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass ein allgemeiner GA in der Regel nicht konvergiert. Jacobs gibt als Ursache dafür die proportionale Selektion an, die nicht in der Lage ist, sehr gute Individuen über mehrere Generationen in der Population zu halten. Dabei werden Individuen, die sehr nahe am Optimum liegen, nur selten auftreten und trotz guter Fitnesswerte nur eine geringe Chance haben, sich zu vermehren, wieder vergessen. Als Lösungsansatz schlägt er eine aus den Evolutionsstrategien bekannte  $(\mu+\lambda)$ -Strategie vor. Mit Hilfe dieser Strategie konnte Jacobs allgemeine Aussagen zur Konvergenz von genetischen Algorithmen treffen, u. a. dass genetische Algorithmen mit Hilfe der  $(\mu+\lambda)$ -Strategie gute Konvergenzeigenschaften besitzen.

Dieses Ergebnis wird benutzt, um ebenfalls eine  $(\mu+\lambda)$ -Strategie anzuwenden. Sie besagt, dass  $\mu$  Eltern  $\lambda$  Nachkommen, Kinder, erzeugen, und aus der gemeinsamen Menge  $\mu+\lambda$  die  $\mu$  besten Individuen in die nächste Generation vererbt werden. Anschaulich bedeutet das, dass bei-

spielsweise aus 4 Eltern 8 Kinder erzeugt werden und aus den 12 Individuen die 4 Besten in die nächste Generation übergehen (siehe Abbildung 3-12).

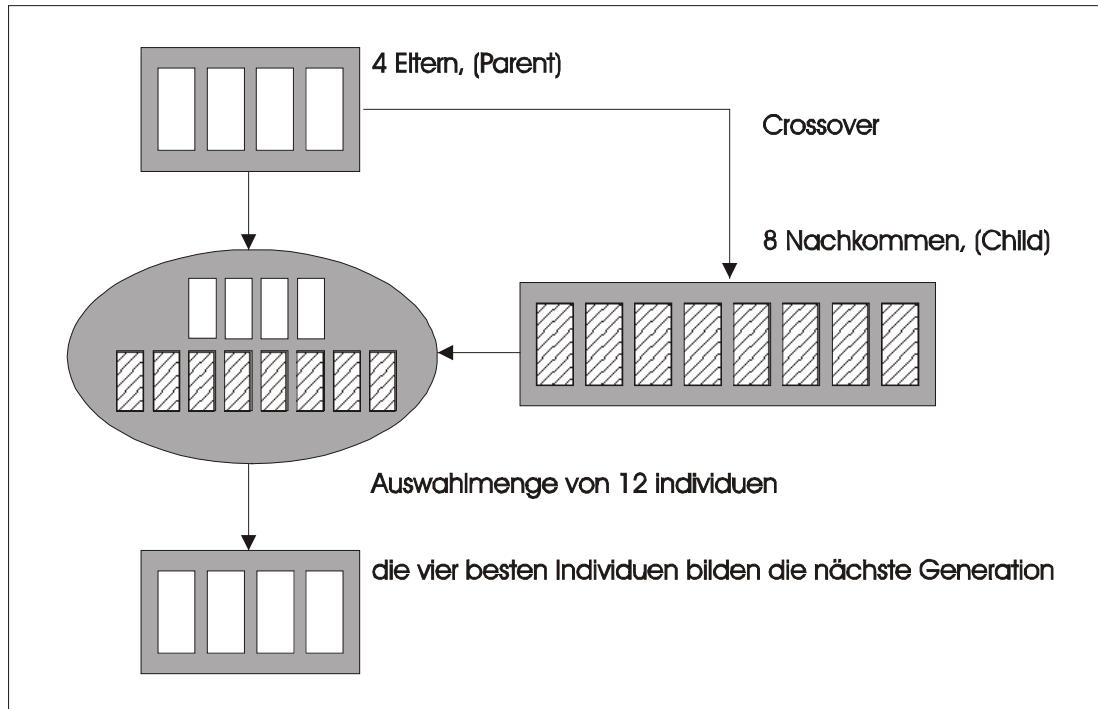


Abbildung 3-12: Qualitative Darstellung der  $(\mu + \lambda)$ -Strategie

Die Selektion der Eltern für den Crossover wird über den Fitnesswert der jeweiligen Individuen nach dem Roulette-Wheel Verfahren durchgeführt. Aus der Menge der  $\mu$  Eltern werden nach dem oben beschriebenen Crossover-Verfahren  $\lambda = 2 * \mu$  Nachkommen erzeugt. Aus der Gesamtmenge von Eltern und Nachkommen werden die besten  $\mu$  Individuen in die nächste Generation übernommen.

### 3.7.4 Steuerung der Berechnung

Die Optimierung mit einem GA läuft automatisch ab, bis das Abbruchkriterium, in diesem Fall  $gen \geq maxgen$ , erfüllt ist. Nun stellt sich die Frage, ob am Ende der Berechnung das Optimum bereits erreicht wurde oder nicht. Wenn das nicht der Fall ist, dann muss man die Berechnung wiederholen und alle notwendigen Iterationsschritte wieder von vorne durchlaufen, jedoch mit einer größeren Anzahl von Iterationen. Dies ist auf die Dauer sehr ermüdend und bringt nicht automatisch eine Verbesserung der Optimierungsgeschwindigkeit bzw. der Sicherheit des Ergebnisses mit sich. Wichtig für den Ablauf eines GA sind vor allem die Crossover-Verfahren und die Mutationsverfahren. Der als Grundalgorithmus verwendete SGA von Goldberg [79] besitzt keine Möglichkeit, die Berechnung zu unterbrechen und die Steuerparameter für Crossover, Mutation und Anzahl der Generationen zu verändern. Infolge ungünstiger Steuerparameter kann es vorkommen, dass ein Algorithmus das Optimum nicht findet oder sehr früh stagniert. Aus diesen Gründen ist es wichtig, eine Möglichkeit zu schaffen, mit der der Optimierungsprozess während des Ablaufs abgebrochen werden kann, die Steuerparameter neu festgelegt werden können oder die Berechnung einfach fortgesetzt werden kann, falls  $maxgen$  überschritten ist. Diese Ablaufsteuerung kombiniert mit einer grafischen Anzeige, die den Ablauf aufzeichnet, ist eine wesentliche Ergänzung des Grundalgorithmus. Im folgenden werden nun die Methoden zur Steuerung der Berechnung vorgestellt, wie sie in dieser Arbeit verwendet werden.

#### 3.7.4.1 Neuberechnung

Mit der Entscheidung für eine Neuberechnung wird die bisherige Berechnung beendet und alle Parameter auf die Ausgangsstellung zurückgesetzt. Dies ist eine sinnvolle Möglichkeit, die Berechnung zu wiederholen, wenn man während der Berechnung erkennt, dass diese stagniert. Um zu erkennen, ob eine Berechnung stagniert oder ob ein Extremum erreicht wurde, ist einige Rechenerfahrung notwendig. Selbstverständlich sollte man sich nicht auf einen Rechenlauf verlassen, sondern stets mehrere Berechnungen vornehmen, um mit relativ hoher Wahrscheinlichkeit ein brauchbares Ergebnis zu erhalten.

#### 3.7.4.2 Änderung der Optimierungsparameter

Die Änderung der Optimierungsparameter erlaubt eine direkte manuelle Steuerung der Berechnung während des Ablaufs. Die wichtigsten Optimierungsparameter sind

- maxgen: maximale Anzahl der Generationen, die in der folgenden Berechnung durchlaufen werden.
- pcross: Wahrscheinlichkeit, mit der ein Crossover stattfindet.
- pmutation: Wahrscheinlichkeit, mit der einzelne Bitstrings mutiert werden.
- popsize: Größe der Population.
- Variablen: Einzelne Optimierungsvariablen können zu- oder abgeschaltet werden.

Dem letzten Punkt, der Steuerung der Optimierungsvariablen, kommt eine besondere Bedeutung zu, auf die hier genauer eingegangen wird.

Wenn nun im Verlauf einer Berechnung festgestellt wird, dass sich einige Variablen nicht mehr verändern, und angenommen wird, dass diese Variablen bereits den zum Optimum gehörigen Wert besitzen, dann ist die Möglichkeit gegeben, diese Variablen aus der weiteren Optimierung auszuschließen. Es wird der letzte Wert für die nachfolgenden Berechnungen beibehalten. Dadurch kann die Konvergenz beschleunigt werden.

#### 3.7.4.3 Berechnung fortsetzen

Nachdem das Abbruchkriterium erfüllt ist und somit die Berechnung der vorgegebenen Generationen beendet ist, besteht die Möglichkeit, weitere Generationen mit den vorgegebenen Einstellungen der Steuerparameter zu berechnen. Das ist für solche Fälle sinnvoll, bei denen noch kein erkennbares Endergebnis vorliegt. Der Hauptgrund dieser Option im Rechenfortgang liegt in der Möglichkeit, die Anzahl der maximalen Generationen, maxgen, relativ klein zu wählen und die Berechnung gegebenenfalls fortzusetzen. Dadurch besteht die Möglichkeit, die Berechnung in mehrere kleine Iterationsintervalle zu zerlegen, wobei jeweils steuernd in den weiteren Berechnungsverlauf eingegriffen werden kann.

#### 3.7.5 Einzelberechnung

Zusätzlich zu den oben genannten Möglichkeiten der manuellen Steuerung wird eine weitere Option im Rechenablauf integriert, die Einzelberechnung. Diese Option hat mit der eigentlichen Optimierung nichts zu tun. Sie eröffnet aber neue Möglichkeiten der Informationsbeschaffung, die im Zusammenhang mit einer Entwurfsoptimierung von großer Bedeutung sind.

Die Einzelberechnung, d. h. individuelle Veränderung einzelner Parameter und Neuberechnung der Bewertungs- und Fitnesswerte, hat folgende Vorteile:

- Es wird eine Möglichkeit geschaffen, die berühmte Frage "was wäre wenn ...?" zu beantworten, d. h. dass manuell einzelne Parameter verändert werden können und die neuen Berechnungsergebnisse mit den Ergebnissen der vorangehenden Berechnung verglichen werden können.

- Durch die Veränderung einzelner Variablen und deren Auswirkung auf die Berechnung ist man in der Lage, Variablen, deren Veränderung sich deutlich verschlechternd auf die Bewertung und auf die Fitness auswirken, zu finden. Diese können dann mit dem "guten" Wert im weiteren Optimierungsverfahren beibehalten werden, sie werden aber als Variable aus dem Bitstring entfernt. Dadurch wird der weitere Prozess vereinfacht und beschleunigt.
- Auf der Suche nach dem Optimum muss man sich immer wieder vor Augen führen, dass es bei multimodalen Problemen, wie bei einer Entwurfsoptimierung, "das Optimum" gar nicht gibt. Es ist durchaus möglich, dass mehrere Extrema mit nur geringfügigen Unterschieden nebeneinander existieren. Um aus diesem Gebirge mit vielen ähnlich hohen Bergen den höchsten Berg herauszufinden, sind sehr feine Variablenveränderungen notwendig, die ein GA nicht leisten kann, d. h. dass hier die Grenze der GA erreicht ist. Dennoch sind durch die Einzelberechnung feine Veränderungen der Variablen möglich, deren Auswirkungen sofort im Zusammenhang mit dem vorangehenden GA-Ergebnis verglichen werden können.

### 3.7.6 Bewertung / Fitnessfunktion

Der Bewertung eines Individuums kommt eine besondere Bedeutung zu, da ein Verfahren ausgewählt werden muss, mit dem aus den vielen einzelnen Bewertungskriterien ein Gesamtnutzen, eine Bewertungszahl ermittelt werden kann. Dieser Gesamtnutzen wird dann dazu verwendet, einen Fitnesswert zu berechnen.

#### 3.7.6.1 Bewertungsmodell

In der Literatur [5], [20], [61], [74], [75] werden verschiedene multikriterielle Bewertungsmodelle diskutiert. Grundsätzlich ist allen Modellen gleich, dass die einzelnen Bewertungskriterien genau definiert und auf Unabhängigkeit voneinander untersucht werden. Das bedeutet, dass die Kriterien so gewählt werden müssen, dass ein Sachverhalt durch genau ein Kriterium beschrieben und beurteilt wird.

Das einfachste Modell in der Entscheidungstheorie ist das "Additive Modell" in der Form

$$\Phi(a_i) = \sum_{p=1}^r g_p \cdot u_{ip} \quad (Gl. 3-3)$$

$\Phi(a_i)$ .....Gesamtnutzen ( Bewertungszahl) der i-ten Alternative

$g_p$ .....Gewichtung des p-ten Ziels

$u_{ip}$  .....individueller Nutzenwert des Zielkriteriums  $k_p$

$$a_i^* = \max\{\Phi(a_i)\} \quad (Gl. 3-4)$$

$a_i^*$  .....Lösungsvariante mit maximalem Nutzen

Mit Hilfe des additiven Modells kann für jede Alternative ein Gesamtnutzen berechnet werden. Als Lösung des Entscheidungsproblems wird diejenige Alternative betrachtet, deren Gesamtnutzen am größten ist.

Die Vorteile des additiven Modells liegen in der Einfachheit und der Linearität. Es ist ein sehr transparentes und damit leicht zu verstehendes Modell. Ein wesentlicher Vorteil im Zusammenhang mit der Problematik der Entwurfsoptimierung ist die einfache Erweiter- und Veränderbarkeit. Auch die Stabilität des Modells ist ein wichtiger Vorteil für die Anwendung.

Die Schwierigkeiten dieses Modells liegen jedoch in der Gewichtung der einzelnen Kriterien und in der Ermittlung der Wertefunktionen.

Die Gewichtung der einzelnen Kriterien ist in jedem Fall subjektiv und vom Anwender abhängig. Im Zusammenhang der Entwurfsoptimierung, bei der ein Gebäude entsprechend den Angaben eines Bauherrn berechnet werden soll, stellt die Gewichtung der Kriterien eine interessante Möglichkeit dar, durch Vergleichsrechnungen mit verschiedenen Zielgewichtungen eine auf den Bauherrn abgestimmte Lösung zu finden. Weiterhin lässt sich mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen der Gewichte der Einfluss einzelner Kriterien auf die Lösung einer Bauaufgabe ermitteln.

Die Ermittlung von Wertefunktionen stellt eine besondere Schwierigkeit dar. Zum einen müssen Bewertungen verschiedener Einheiten normiert werden, d. h. dass Maßzahlen mit unterschiedlichen Einheiten, z. B. DM, m<sup>2</sup>, m<sup>3</sup>, kg, t etc., in eine Skala von 0 bis 1 umgerechnet werden müssen. Das andere Problem ist die unterschiedliche Zielforderung zwischen Maximierung und Minimierung. Trotz dieses Unterschieds sind die Werte auf die genormte Skala abzustimmen.

Allgemein sind Wertefunktionen eine mathematische Formulierung der Präferenzen des Entscheiders, die einheitlich abgebildet werden (z. B. Zahlen zwischen 0 und 1). In [20] werden drei prinzipielle Methoden zur Ermittlung von Wertefunktionen beschrieben:

- Direct-Rating-Methode
- Methode gleicher Wertdifferenzen
- Halbierungsmethode.

#### Direct-Rating-Methode

Bei der Direct-Rating-Methode werden jeder Zielausprägung Werte zugewiesen. Hierbei wird die Alternative mit der besten Konsequenz mit 100 Punkten bewertet und die Alternative mit der schlechtesten Konsequenz mit 0 Punkten. Im nächsten Schritt muss der Entscheider die dazwischen liegenden Alternativen bewerten, so dass die Rangordnung bzw. die Präferenz des Entscheiders beibehalten wird. Nachdem dies geschehen ist, werden die Bewertungen normiert, d. h. dass die Wertefunktion nur Ergebnisse zwischen 0 und 1 annimmt.

#### Methode gleicher Wertdifferenzen

Bei dieser Methode werden aus der Voraussetzung gleicher Wertdifferenzen die zugehörigen Ausprägungen berechnet. Die schlechteste Alternative wird gleich null gesetzt. Im nächsten Schritt wird eine Erhöhung dieser Ausprägung festgelegt, die als Ausgangspunkt für die weitere Berechnung dient. Sei  $x_0$  die schlechteste Ausprägung und sei  $x_1$  die um ein bestimmtes Intervall erhöhte Ausprägung, so gilt für die nächste Ausprägung  $x_2$ :

$$\frac{x_0}{x_1} \approx \frac{x_1}{x_2} \quad (Gl. 3-5)$$

Es empfiehlt sich, eine Intervallsteigerung zu wählen, die ungefähr 1/5 des Gesamtintervalls darstellt.

#### Halbierungsmethode

Wie bei der Methode gleicher Wertdifferenzen werden bei der Halbierungsmethode die Zielausprägungen der Wertefunktionen aus der Halbierung der Funktionswerte gewonnen. Aus der schlechtesten und der besten Zielausprägung wird ein Mittelwert derart ermittelt, daß der Übergang von der schlechtesten Alternative zum Mittelwert genauso viel bedeutet wie der Übergang vom Mittelwert zur besten Ausprägung. Seien die schlechteste Ausprägung mit  $x^-$  und die beste Ausprägung mit  $x^+$  bezeichnet, so folgt



$$\frac{x^-}{x_{0,5}} \approx \frac{x_{0,5}}{x^+} \quad (Gl. 3-6)$$

Analog zur Ermittlung des Mittelwertes können weitere Zwischenwerte definiert werden. Aus diesen Wertepaaren kann man dann die Wertefunktion zeichnen. Wichtig ist dabei, daß die Funktionswerte normiert werden.

Die Halbierungsmethode eignet sich besonders gut für eine Automation. Allerdings müssen die Grenzen der Ausprägung, d. h. Ober- und Untergrenze, vorgegeben werden. Bei einer Maximierung wird  $x^- = 0$  und  $x^+ = 1$  gesetzt. Entsprechend wird bei einer Minimierung  $x^- = 1$  und  $x^+ = 0$  gesetzt. Diese Zusammenhänge sind in Abbildung 3-13 verdeutlicht.

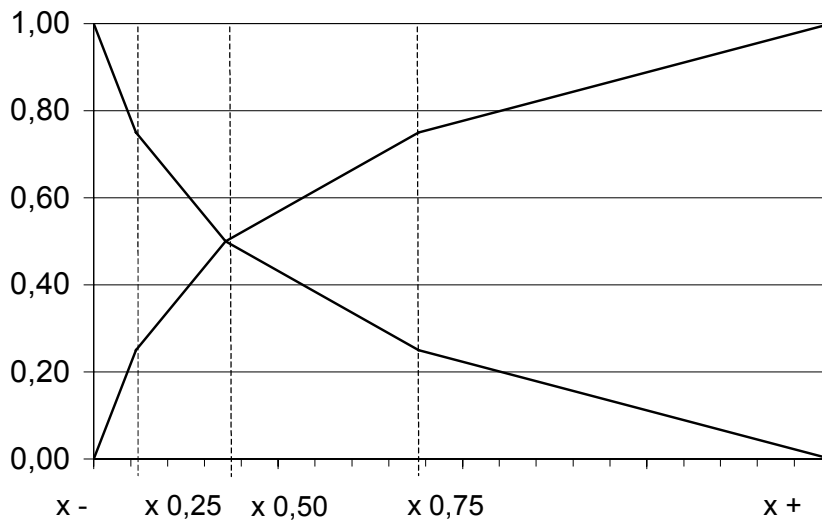


Abbildung 3-13: Beispiel für Maximierung und Minimierung mit der Halbierungsmethode

### 3.7.6.2 Fitnessfunktion

Da in der Berechnung des Gesamtnutzens die gesamte notwendige Information steckt, werden an die Fitnessfunktion keine besonderen Anforderungen mehr gestellt. So wird die einfachste Art einer Fitnessfunktion gewählt, die proportional zum Gesamtnutzen, also zur Bewertung ist.

$$F_i = k \cdot \Phi(a_i) \quad (Gl. 3-7)$$

$\Phi(a_i)$ .....Gesamtnutzen der i-ten Alternative, bzw. des i-ten Individuums

$k$ .....Vergrößerungsfaktor

Mit Hilfe des Vergrößerungsfaktors werden die Fitnesswerte skaliert und Differenzen unterschiedlicher Fitnesswerte vergrößert.

### 3.7.7 Zusammenfassung Lösungsansatz

In den vorangegangenen Kapiteln wurde ein Lösungsansatz für eine Entwurfsoptimierung auf der Basis eines einfachen genetischen Algorithmus (SGA) entwickelt. Die wesentlichen Veränderungen und Erneuerungen zum SGA sind der n-Point-Crossover, die  $(\mu+\lambda)$ -Strategie, die Optionen den Berechnungsfortgang manuell zu steuern und damit zu beeinflussen und die Möglichkeit Einzelberechnungen durchzuführen.

Das Ablaufschema des modifizierten Algorithmus ist in Abbildung 3-14 dargestellt. Dieser Algorithmus dient als allgemeine Grundlage eines Systems zur Entwurfsoptimierung.

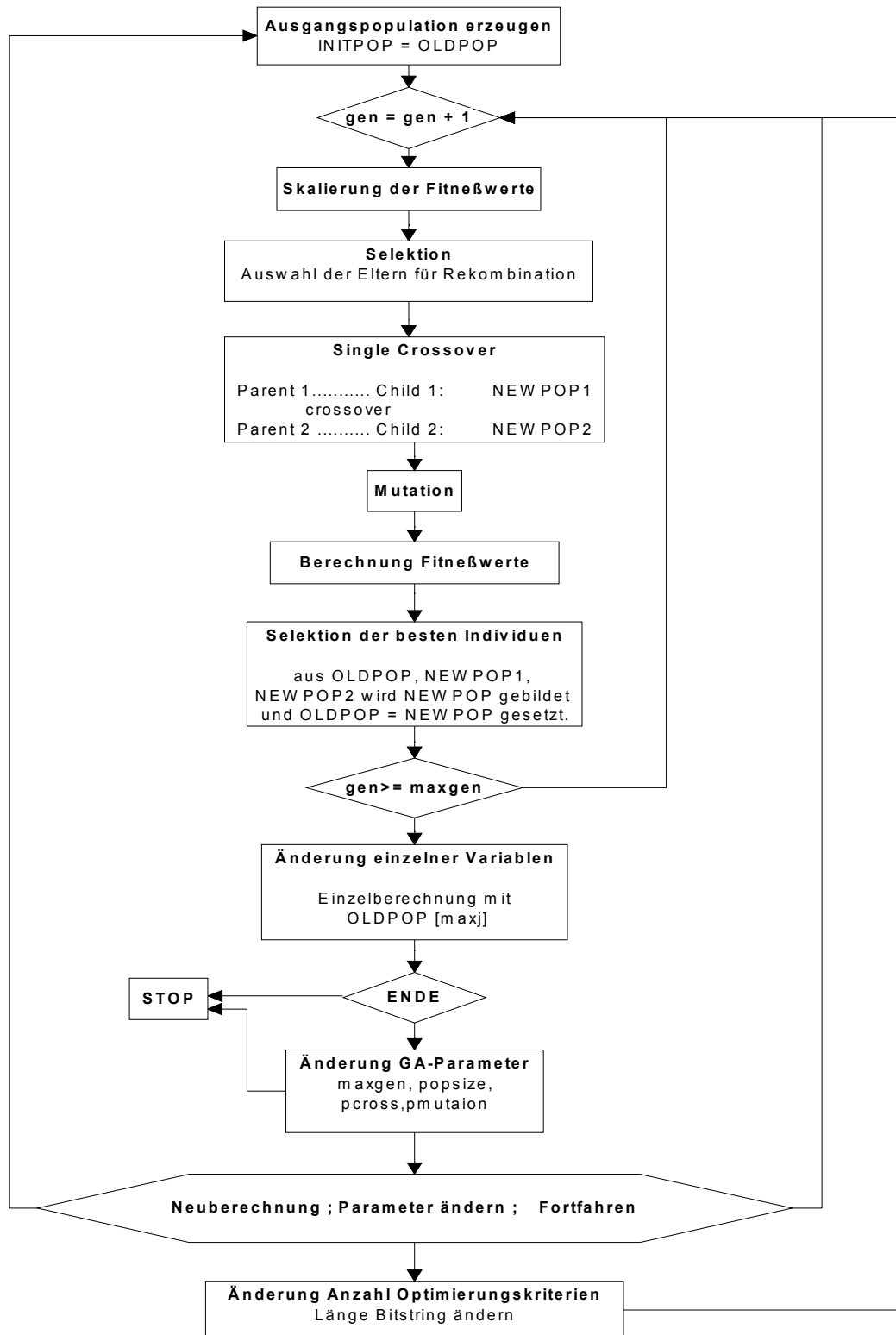


Abbildung 3-14: Ablaufdiagramm modifizierter GA für Entwurfsoptimierung

### 3.8 Testfunktion

#### 3.8.1 Definition Testfunktion

In der Literatur werden verschiedene Testfunktionen diskutiert, anhand derer die Qualität eines GA gemessen werden kann. Für die Überprüfung des in Kapitel 3.7 vorgestellten Algorithmus wird eine Testfunktion gewählt, die viele verschiedene und ähnliche Extrema aufweist. Die Funktion mit dieser "böartigen" Eigenschaft wurde von H.P. Schwefel entwickelt. Sie wird im n-dimensionalen Raum folgendermaßen beschrieben:

$$f(\bar{x}) = \sum_{i=1}^n -x_i \cdot \sin\left(\sqrt{|x_i|}\right); -500 \leq x_i \leq 500 \quad (Gl. 3-8)$$

Diese Funktion besitzt ein globales Minimum an der Stelle

$$x^* = (420.9687, 420.9687, \dots, 420.9687)$$

Für den zweidimensionalen Fall lautet die Funktion:

$$f(x, y) = -x \cdot \sin\left(\sqrt{|x|}\right) - y \cdot \sin\left(\sqrt{|y|}\right); -500 \leq x, y \leq 500 \quad (Gl. 3-9)$$

Die Funktionswerte sind in nachfolgender Abbildung für den zweidimensionalen Fall dargestellt.

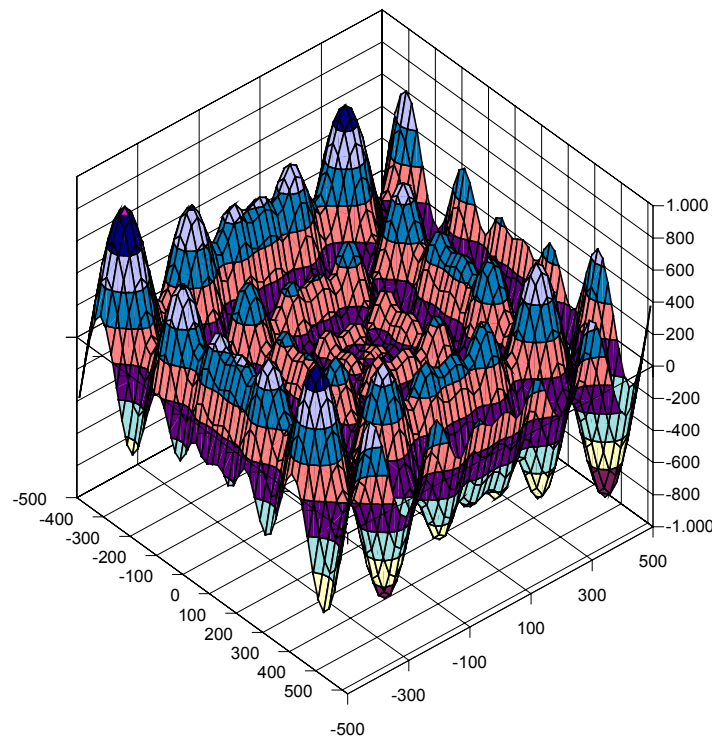


Abbildung 3-15: Testfunktion (n=2) nach H.P. Schwefel

#### 3.8.2 Vergleichsberechnungen für n=10

Verschiedene Vergleichsberechnungen haben gezeigt, dass der einfache genetische Algorithmus SGA ohne die in Kapitel 3.7 vorgestellten Zusätze nicht in der Lage ist, das globale Minimum zu finden bzw. kein Konvergenzverhalten aufweist.

Ein besseres Konvergenzverhalten und die Ermittlung des globalen Minimums an der Stelle  $x^{10} = (420.9687, 420.9687, \dots, 420.9687)$  mit  $f(x^{10}) = -4189,829$  erfolgt bei einer Codierung im

Graycode und bei Verwendung eines n-Point-Crossover mit  $n=10$ . Der 10-fache Crossover begründet sich darin, dass bei genetischen Algorithmen die Qualität und die Konvergenzgeschwindigkeit unter anderem vom Crossover-Verfahren abhängen. Um bei 10 Variablen eine größtmögliche Veränderung jeder einzelnen Variable zu gewährleisten, wird der n-Point-Crossover so durchgeführt, dass gleich viele Schnitte entsprechend der Anzahl der Variablen durchgeführt werden und dass die Schnitte immer innerhalb des Bitstrings einer Variablendefinition stattfinden.

Die Variablen der Testfunktion sind reelle Zahlen im Intervall von  $-500$  bis  $500$ . Durch die Codierung in Bitstrings sind reelle Variablen nur schwer für GA zu codieren. Für die Vergleichsberechnungen wurden die Variablen als Bitstring mit einer Länge von 25 codiert. Dies bedeutet eine Genauigkeit der Variablen von

$$\frac{1}{2^{25}} = 2,9802 \cdot 10^{-8} \quad (\text{Gl. 3-10})$$

Diese Genauigkeit ist bei Variablen bis 500 erst in der fünften Nachkommastelle bemerkbar und wird daher als ausreichend angenommen.

Im folgenden werden nun die Größe der Population, die Crossover- und die Mutationswahrscheinlichkeit variiert, um allgemeine Aussagen über die Qualität des modifizierten GA nach Abbildung 3-14 zu erhalten.

In einem ersten Schritt wird die Größe der Population variiert. Diese Größe wirkt sich auf die Rechengeschwindigkeit aus und bietet eine Möglichkeit, die Qualität der Berechnung zu steuern. Mit der Größe der Population wird die Trefferwahrscheinlichkeit beeinflusst. Bildlich gesprochen werden bei großen Populationen mehr Gebiete des Lösungsraumes durchschritten bzw. berührt als bei kleinen Populationen.

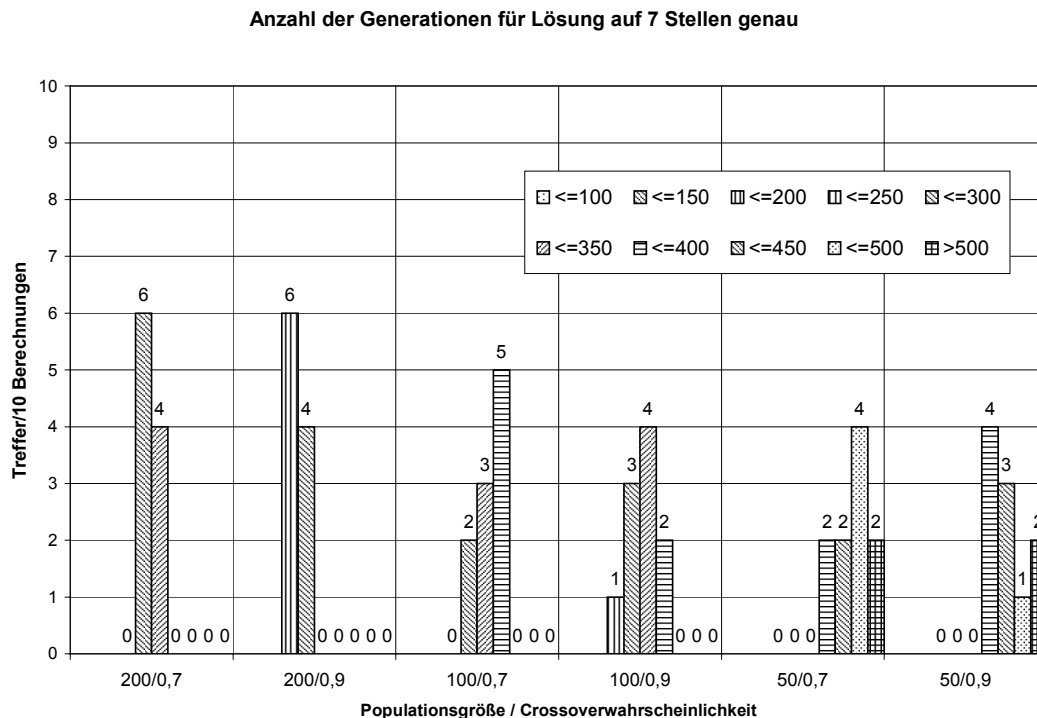


Abbildung 3-16: Auswirkung der Populationsgröße auf die Rechengeschwindigkeit

Es zeigt sich, dass mit zunehmender Populationsgröße auch die Geschwindigkeit steigt, mit der das globale Minimum erreicht wird. Bei einer Populationsgröße von 50 Individuen wird das globale Minimum erst nach durchschnittlich 450 Generationen erreicht, während bei 200 Individuen das Minimum bereits nach durchschnittlich 300 Generationen erreicht wird. Zwischen diesen Randwerten weisen die Ergebnisse mit einer Populationsgröße von 100 Individuen gute Ergebnisse auf, da die durchschnittliche Berechnungsdauer mit 350 Generationen, bezogen auf die Gesamtdifferenz von 150, nur 1/3 schlechter ist und da die Größe der Population um die Hälfte kleiner ist als bei der Berechnung mit 200 Individuen. Daher werden die nachfolgenden Untersuchungen zum Einfluss der Crossover- und Mutationswahrscheinlichkeit mit einer Populationsgröße von 100 Individuen durchgeführt.

Zur Untersuchung des Einflusses der Crossover- und Mutationswahrscheinlichkeit werden folgende Annahmen getroffen.

Der Crossover ist bei GA das entscheidende Verfahren zur Veränderung der einzelnen Variablen und wird von 0,5 bis 0,9 variiert.

Die Mutation ist für die "Feinsteuerung" der Variablenveränderung zuständig. Diese Variable wird in Schritten von 0,02 zwischen 0,03 und 0,09 variiert.

Basierend auf den vorhergehenden Vergleichsberechnungen wird eine Populationsgröße von 100 Individuen gewählt.

Die maximale Anzahl der Generationen beträgt 500. Wird das globale Minimum in diesem Intervall erreicht, so wird für die Berechnung ein "Treffer" gewertet.

Die Berechnungen erfolgen unter Anwendung von 10-Point-Crossover und Graycode.

Das globale Minimum an der Stelle  $x^{10} = (420.9687, 420.9687, \dots, 420.9687)$  hat den Wert  $f(x^{10}) = -4189,829$ .

Die Ergebnisse von jeweils 20 Berechnungen zeigen, dass für Mutationswahrscheinlichkeiten größer als 0,03 das globale Minimum nicht innerhalb 500 Generationen gefunden wird. Bei Verwendung von  $p_{\text{mutation}} = 0,03$  wird bei 20 von 20 Berechnungen das Minimum in den ersten 500 Generationen gefunden.

Die Untersuchung der Konvergenzgeschwindigkeit ergibt, dass bei einer Crossoverwahrscheinlichkeit von 0,9 das globale Minimum der Testfunktion am schnellsten gefunden wird. Das bedeutet, dass für ein schnelles Auffinden des globalen Minimums bei der Testfunktion eine hohe Crossoverwahrscheinlichkeit  $p_{\text{cross}} = 0,9$  und eine kleine Mutationswahrscheinlichkeit  $p_{\text{mutation}} = 0,03$  zu den besten Ergebnissen führten.

Die genauere Untersuchung des Berechnungsganges zeigt einige interessante Eigenschaften des GA. So wird in relativ kurzer Zeit, nach etwa 55 Generationen, ein Ergebnis gefunden, welches auf vier Stellen genau ist und schon sehr nahe am lokalen Minimum liegt. Bei diesem Ergebnis sind noch Ungenauigkeiten der einzelnen Variablen vorhanden. Um die Genauigkeit auf 7 Stellen zu erhöhen, sind weitere 247 Generationen notwendig. Das bedeutet, dass der modifizierte GA bei schwierigen multimodalen Funktionen schnell den Ort des globalen Extremums lokalisieren kann, aber bei reellen Variablen Probleme mit der genauen Ermittlung des Variablenwertes hat.

Bei Erhöhung der Anzahl der Variablen von 10 auf 20 verhält sich der GA bereits schlechter. Zum einen ist die Größe der Population auf 200 Individuen zu erhöhen und zum anderen werden mehr Generationen benötigt, um das globale Extremum zu finden. Die berechneten Ergebnisse können mit einem vertretbaren Aufwand nur auf vier bis fünf Stellen genau berechnet werden. Das bedeutet auch, dass das mathematisch exakte globale Minimum nicht exakt gefunden wird, sondern ein Ergebnis nahe an dem Extremum. Bei Schwankungen der Variablenwerte zwischen 420,1 und 421,9 ist das, bezogen auf den exakten Wert von 420,9687, eine Abweichung von ungefähr  $\pm 0,2\%$ . Auch bei diesen Ergebnissen kann man feststellen, dass der

GA in der Lage ist, bei schwierigen Funktionen das globale Extremum zu lokalisieren, dass jedoch Schwierigkeiten bei der Feinjustierung der Variablen auftreten. Dieses Problem der Feinjustierung ist u. a. auf die Codierung zurückzuführen, die nicht den exakten reellen Raum abbilden kann.

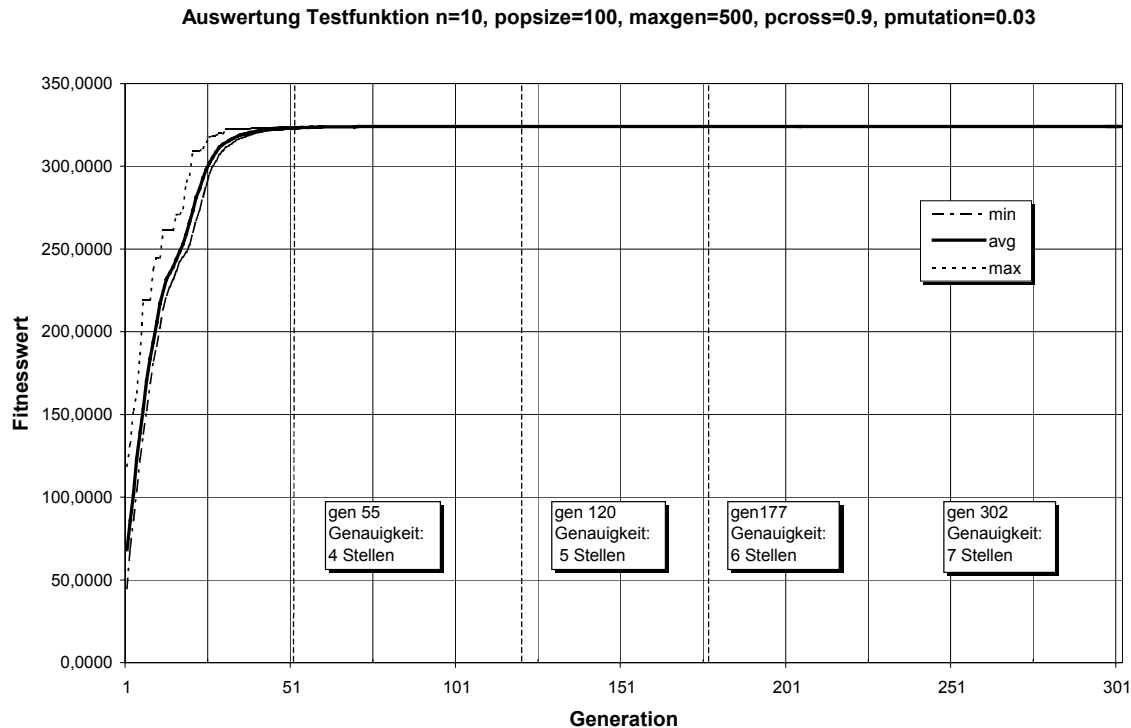


Abbildung 3-17: Verlauf Fitnesswert bei multimodaler Testfunktion n=10

### 3.9 Beispiel Entwurfsoptimierung

Die Auswertung der obigen Testfunktion hat gezeigt, dass der erweiterte GA in der Lage ist, auch bei schwierigen Funktionen das globale Extremum zu finden. Um die Anwendbarkeit auf die Aufgabe einer Entwurfsoptimierung zu überprüfen, wird im folgenden ein Vergleichsbeispiel konstruiert, bei dem das Ergebnis bekannt ist und das von den Variablentypen einer allgemeinen Entwurfsoptimierung entspricht. Im einzelnen werden folgende Vergleiche durchgeführt:

- GA ohne und mit  $(\mu+\lambda)$ -Strategie
- GA ohne und mit Graycodierung
- GA mit 1-Point- und mit n-Point-Crossover (1-Point-XO und n-Point-XO).

Als Beispiel wird ein Bürogeschoss gewählt, dessen Geometrie sich ergibt durch die Größe der Einzelzimmer (A [m<sup>2</sup>]...reelle Variable), durch das Rastermaß (r [m]...reelle Variable) und die Anzahl der Rasterlängen an der Fassadenseite je Büro (nf... diskrete Variable).

Als allgemeine Geschossgeometrie wird ein Rechteck angenommen, dessen Länge und Breite von der Zimmergröße und der maximalen Fluchtweglänge ( $\leq 35,0$  m) abhängt. Als Optimierungskriterien werden der Bruttorauminhalt (BRI), die Bruttogeschossfläche (BGF), die maximale Anzahl der Zimmer (nzi), die Trennwandfläche (ATw) und die Fassadenfläche (AFas) gewählt. Hierbei sollen BRI minimiert, BGF und nzi maximiert, Atw und Afas minimiert werden.

### 3.9.1 Grundriss Bürogeschoss

In der folgenden Abbildung ist der prinzipielle Grundriss eines Bürogeschosses dargestellt. Wichtig ist in diesem Zusammenhang, dass die Anzahl der Büros eine gerade Zahl ist, da gleich viele Büros an beiden Fassadenseiten angeordnet werden.

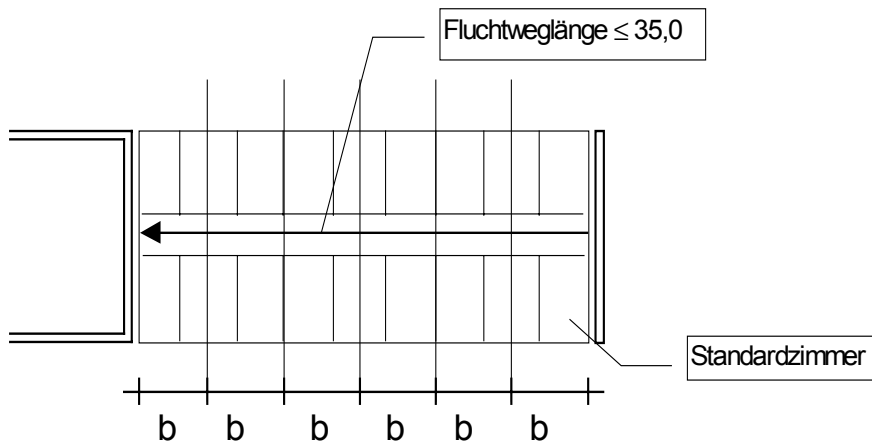


Abbildung 3-18: Systemskizze Geschossgrundriss

### 3.9.2 Optimierungskriterien

Für eine mehrkriterielle Optimierung in Anlehnung an allgemeine Bürogeschossbauten mit verschiedenen Variablentypen werden folgende Optimierungskriterien definiert:

- Bruttonrauminhalt (BRI)  $\rightarrow \min$
- Bruttogeschossfläche (BGF)  $\rightarrow \max$
- Anzahl Zimmer (nzi)  $\rightarrow \max$
- Trennwandfläche (ATw)  $\rightarrow \min$
- Fassadenfläche (AFas)  $\rightarrow \min$

### 3.9.3 Entwurfsvariablen

Es werden folgende freie, vom Programm zufällig initialisiert und veränderbare Variablen definiert:

- Bürofläche  $A$   $[m^2]$   $A \in [12,0 ; 20,0]$  reelle Variable
- Rastermaß  $r$   $[m]$   $r \in [1,0 ; 2,0]$  reelle Variable
- Anzahl Fassadenraster  $nf$   $[-]$   $nf \in [2,3,4,5]$  diskrete Variable

Bei der Definition der reellen Zahlen sei darauf hingewiesen, dass eine Genauigkeit auf  $10^{-2}$  ausreicht, d. h. es wird auf cm genau gerechnet. Das wiederum bedeutet, dass die Variable Bürofläche exakt 801 Werte und die Variable Rastermaß exakt 101 Werte annehmen kann. Aus dieser Überlegung heraus kann man davon ausgehen, dass sich bei geeigneter Codierung die Variablen Bürofläche und Rastermaß wie diskrete Variablen verhalten.

### 3.9.4 Berechnung der Kriterien

Es werden nun die für die Berechnung der Bewertungsparameter notwendigen Zusammenhänge definiert.

**Breite Standardbüro, Annahmen Trennwanddicke = 10 cm**

$$b = nf \cdot r - 0,1 \quad (\text{Gl. 3-11})$$

**Tiefe Standardbüro**

$$t = \frac{A}{b} \quad (\text{Gl. 3-12})$$

**Lichte Raumhöhe**

Die Berechnung erfolgt auf der Basis, dass die Tiefe eines Raumes, der natürlich belichtet werden soll, gleich dem 1,5-fachen Abstand von Fußboden zu Oberkante Fenster ist.

$$h = \frac{t}{1,5} \geq 2,5m \quad (\text{Gl. 3-13})$$

**Breite Geschossmodul**

Es wird hierbei von einer Flurbreite inklusive der Trennwanddicke von 2,20 m ausgegangen.

$$bGM = 2 \cdot t + 2,2 \quad (\text{Gl. 3-14})$$

**Anzahl der Zimmer**

$$nzi = 2 \cdot \frac{35,0 - 0,5 \cdot bGM}{nf \cdot r} \in Z \quad (\text{Gl. 3-15})$$

**Länge Geschossmodul**

$$lGM = 0,5 \cdot nzi \cdot (b + 0,1) \quad (\text{Gl. 3-16})$$

**Bruttorauminhalt**

$$BRI = bGM \cdot lGM \cdot h \quad (\text{Gl. 3-17})$$

**Bruttogeschossfläche**

$$BGF = bGM \cdot lGM \quad (\text{Gl. 3-18})$$

**Fläche Trennwände**

$$ATw = ((nzi - 2) \cdot t + 2 \cdot lGM) \cdot h \quad (\text{Gl. 3-19})$$

**Fläche Fassade**

$$AFas = 2 \cdot lGM \cdot h \quad (\text{Gl. 3-20})$$

### 3.9.5 Bewertungs- und Fitnessfunktion

Aus den oben beschriebenen Gleichungen wird der Gesamtnutzen bzw. die Bewertung der i-ten Alternative berechnet zu:

$$\Phi(a_i) = g_1 \cdot \min(BRI) + g_2 \cdot \max(BGF) + g_3 \cdot \max(nzi) + g_4 \cdot \min(ATw) + g_5 \cdot \min(Afas) \quad (\text{Gl. 3-21})$$

Die Gewichtungsfaktoren  $g_1$  bis  $g_5$  werden vom Anwender vorgegeben und normiert, d. h. dass die Summe aller Gewichte gleich null ist. Die Berechnung der Wertefunktion entsprechend einer Maximierung oder Minimierung erfolgt gemäß Kapitel 3.7.6.1. Die dafür notwendigen Bereichsgrenzen werden definiert zu:

- BRI:            min = 300,0 m<sup>3</sup>            max = 2000,0 m<sup>3</sup>
- BGF            min = 120,0 m<sup>2</sup>            max = 450,0 m<sup>2</sup>



- nzi            min = 10            max = 20
- Atw           min = 130,0 m<sup>2</sup>    max = 500,0 m<sup>2</sup>
- Afas           min = 130,0 m<sup>2</sup>    max = 280,0 m<sup>2</sup>

Die Gewichtungsfaktoren werden für die Vergleichsberechnungen alle gleich 1,0 gesetzt, das bedeutet, dass alle Kriterien die gleiche Wichtigkeit besitzen.

Durch Berechnung der Wertefunktionen und der normierten Gewichtung liegt die Bewertungszahl zwischen 0 und 5, da fünf verschiedene Kriterien definiert sind. Um diesen kleinen Zahlenbereich für das Verfahren zu vergrößern und somit die Unterschiede einzelner Individuen zu vergrößern, wurde ein Vergrößerungsfaktor  $k$  von  $200 = 1000/5$  gewählt, so dass die Fitnesswerte zwischen 0 und 1000 liegen. Die Fitnessfunktion berechnet sich zu:

$$F_i = 200 \cdot \Phi(a_i) \quad (\text{Gl. 3-22})$$

$\Phi(a_i)$ .....Gesamtnutzen (Bewertungszahl) der  $i$ -ten Alternative, bzw.  $i$ -ten Individuum

### 3.9.6 Vergleichsberechnungen

Die oben beschriebene Entwurfsoptimierung ist in eine Berechnungssoftware integriert, mit deren Hilfe alle notwendigen Vergleichsberechnungen vorgenommen werden können. Im Anhang A-2 sind die exakten Berechnungsergebnisse zusammengestellt.

Es existieren exakt zwei Maxima mit gleichem Fitnesswert. Das eine Maximum mit einem Fitnesswert von 658,7754 liegt bei  $A=12,00 \text{ m}^2$ ;  $r=1,68 \text{ m}$  und  $nf=2$  (siehe Abbildung 3-19), das andere Maximum mit demselben Fitnesswert liegt bei  $A=12,00 \text{ m}^2$ ;  $r=1,12 \text{ m}$  und  $nf=3$  (siehe Abbildung 3-20). Diese zwei Ergebnisse sind logisch nachvollziehbar, da die Raumbreite  $b = 2 \cdot 1,68 \text{ m} = 3 \cdot 1,12 \text{ m} = 3,36 \text{ m}$  beträgt. Bei gleicher Raumbreite der Ergebnisse ist auch die Raumtiefe und somit die Geometrie der beiden Lösungen identisch.

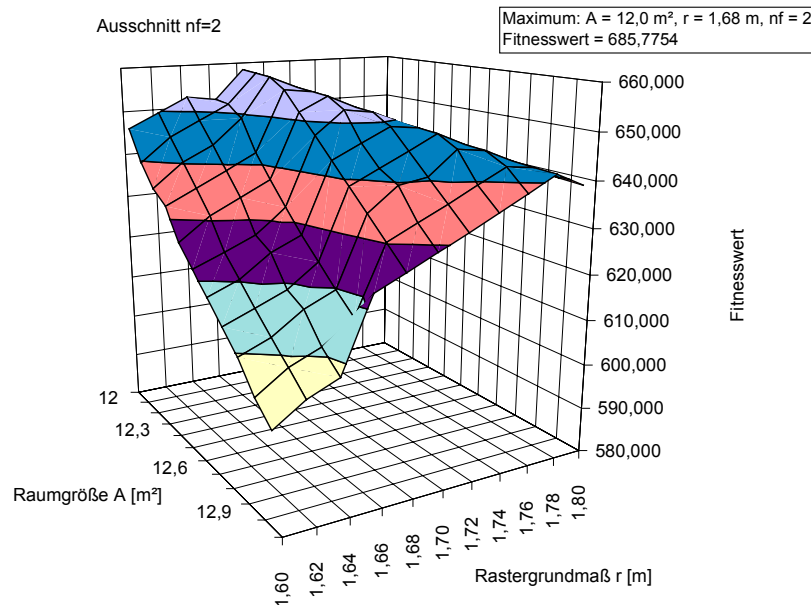


Abbildung 3-19: Maximum bei  $nf=2$

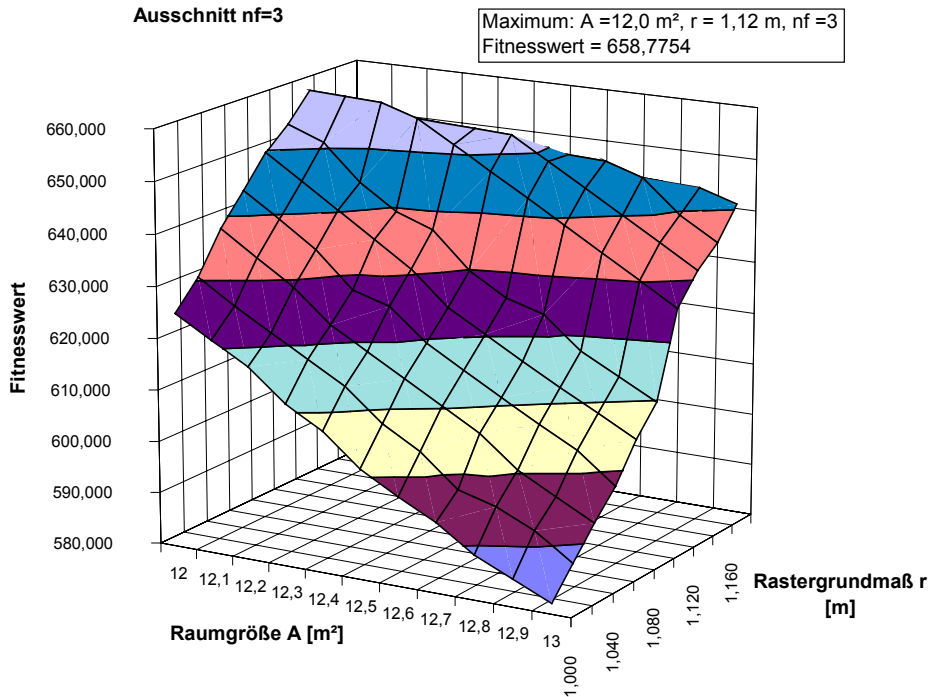


Abbildung 3-20: Maximum bei  $nf=3$

Mit Hilfe der erstellten Software werden nun Vergleichsberechnungen durchgeführt. Zuerst wird hierbei überprüft, inwieweit mit einem einfachen genetischen Algorithmus (SGA) das Problem gelöst werden kann. Die Ergebnisse in Abbildung 3-21 zeigen sehr deutlich, dass mit einem SGA keine Konvergenz zu irgend einem Wert und kein Ergebnis gefunden wird, jedoch aber mit dem modifizierten GA unter Einbeziehung einer  $(\mu+\lambda)$ -Strategie.

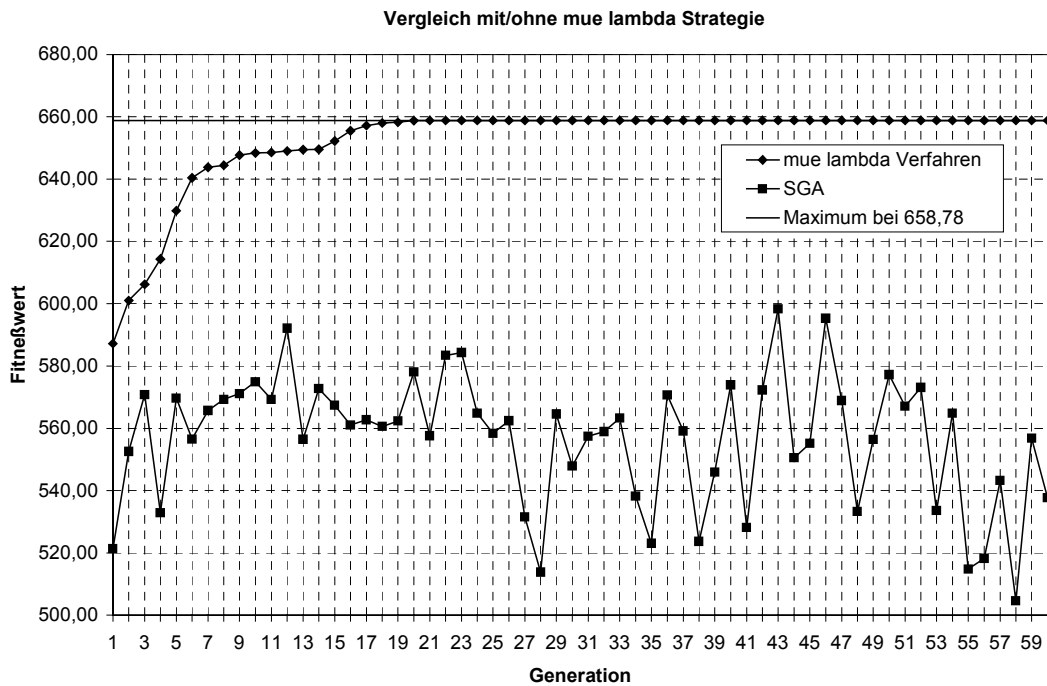


Abbildung 3-21: Vergleich SGA und GA mit  $(\mu+\lambda)$ -Strategie

Aus diesem Grund wird im folgenden das Verhalten eines GA mit erweiterter  $(\mu+\lambda)$ -Strategie untersucht.

Da die Größe der Population eine direkte Auswirkung auf die Berechnungsgeschwindigkeit hat, ist das Ziel eine Populationsgröße zu finden, die so klein wie möglich aber auch so groß wie nötig ist. Bei vielen zufälligen Vergleichsrechnungen wurde beobachtet, dass mit einer Populationsgröße von  $\text{popsize}=20$  relativ gute Ergebnisse erzielt wurden. Ohne diesen Sachverhalt näher zu untersuchen, wurden alle folgenden Vergleichsrechnungen mit einer Populationsgröße  $\text{popsize}=20$  durchgeführt. Die genauere Untersuchung der günstigsten Populationsgröße erfolgt nach der Auswertung der nachfolgenden Vergleichsberechnungen.

Wichtig für das Konvergenzverhalten und die Konvergenzgeschwindigkeit eines GA sind zum einen die Wahl der Codierung und des Crossover-Verfahrens und zum anderen die Crossover- und Mutationswahrscheinlichkeit. Für die Kombinationen

- Standardbinärcode 1-Point-XO,
- Standardbinärcode n-Point-XO,
- Graycode 1-Point-XO und
- Graycode n-Point-XO.

wurden jeweils 200 Berechnungen durchgeführt, wobei für die Mutationswahrscheinlichkeit  $p_{\text{mutation}}$  die Werte 0,05 0,10 0,15 0,20 und für die Crossoverwahrscheinlichkeit die Werte 0,4 0,5 0,6 und 0,7 eingesetzt wurden. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in den folgenden im Anhang A-2 dargestellt. Die Anzahl der Berechnungen, bei denen das Extremum (Fitnesswert = 658,7754) nach maximal 50 Generationen erreicht wurde, ist als Trefferwahrscheinlichkeit in Prozent dargestellt.

Aus den Berechnungsergebnissen geht hervor, dass bei der Wahl einer Codierung in Graycode in Verbindung mit einem n-Point-Crossover die besten Ergebnisse erzielt werden. Bei einer Mutationswahrscheinlichkeit von 0,10 ist die Trefferwahrscheinlichkeit über 90%. Diese hohe Trefferwahrscheinlichkeit wurde bereits bei einer relativ kleinen Populationsgröße von 20 Individuen erreicht. Um den Einfluss der Populationsgröße zu untersuchen, wurden weitere Vergleichsberechnungen mit 40 bzw. 60 Individuen, codiert im Graycode und n-Point-XO Verfahren, durchgeführt. Bei einer Populationsgröße von 40 Individuen und einer Mutationswahrscheinlichkeit von  $p_{\text{mutation}}=0,10$  wird bereits eine Trefferwahrscheinlichkeit von über 99% erreicht. Bei einer weiteren Vergrößerung der Populationsgröße wird die Trefferwahrscheinlichkeit nur unwesentlich größer. Das bedeutet, dass mit einer Populationsgröße zwischen 20 und 40 Individuen ausreichend genaue Ergebnisse erzielt werden können.

### 3.10 Diskussion

Aus den durchgeführten Vergleichsberechnungen resultieren folgende Ergebnisse für eine Entwurfsoptimierung mit genetischen Algorithmen:

- Damit der Algorithmus konvergiert, ist ein Ersetzungsschema nach der  $(\mu+\lambda)$ -Strategie notwendig, d. h. dass die besten  $\mu$  Individuen aus einer Menge von  $\mu$  Eltern und  $\lambda$  Nachkommen in die nächste Generation übergehen.
- Die Ermittlung der Fitnessfunktion erfolgt als einfache Addition der Bewertungskriterien, die mit einem beliebigen Faktor versehen werden. Wichtig in diesem Zusammenhang ist nur die Normierung der Bewertung einzelner Kriterien. Es ist weiterhin darauf zu achten, dass das Verfahren als Maximierungsaufgabe ausgelegt ist, d. h. es wird eine Lösung mit dem höchsten Fitnesswert gesucht. Bei Kriterien mit dem Ziel der Minimierung ist diese Tatsache bei der Ermittlung der Bewertungszahl zu berücksichtigen.

- Die besten Trefferwahrscheinlichkeiten werden für eine Codierung im Graycode im Zusammenhang mit einem n-Point-Crossover erzielt.
- Für die Testfunktion, die nur aus reellen Variablen besteht, wurden gute Ergebnisse mit einer Crossoverwahrscheinlichkeit von  $p_{\text{cross}}=0,9$  und einer Mutationswahrscheinlichkeit von  $p_{\text{mutation}}=0,03$  erzielt. Bei dem Beispiel der Entwurfsoptimierung wurden mit Mutationswahrscheinlichkeiten von 0,10 und Crossoverwahrscheinlichkeiten von 0,6 die guten Ergebnisse erzielt. Für weiterführende Berechnungen werden die betreffenden Wahrscheinlichkeiten innerhalb dieser Erfahrungswerte angenommen.
- Die Berechnungsgeschwindigkeit und die Trefferwahrscheinlichkeit ist von der Populationsgröße abhängig. Je größer die Population, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass das Extremum, das "Optimum" gefunden wird. Der Nachteil der größeren Populationen liegt in den längeren Rechenzeiten.
- Optimierungsprobleme, die überwiegend aus reellen Variablen bestehen, können zwar mit GA gelöst werden, jedoch versagt der Algorithmus bei der exakten Bestimmung (auf mehrere Nachkommastellen genau) der einzelnen Variablenwerte.  
Auf der anderen Seite ist der GA sehr gut geeignet, Optimierungsprobleme mit überwiegend diskreten Variablen zu lösen. Da die Entwurfsoptimierung mit vielen diskreten Variablen arbeitet und zusätzlich die Genauigkeit der reellen Variablen auf  $10^{-2}$  beschränkt ist, ist diese Aufgabenstellung sehr gut für die Anwendung des modifizierten genetischen Algorithmus geeignet.
- Genetische Algorithmen haben den Vorteil, dass die Anzahl der behandelten Parameter und die Anzahl der Kriterien problemlos verändert werden können.
- Da das Verfahren mit genetischen Algorithmen zufallsorientiert ist, empfiehlt es sich, bei einer Anwendung nicht auf das Ergebnis einer Berechnung zu vertrauen, sondern mehrere Berechnungen vorzunehmen, um das Ergebnis zu bestätigen.
- In der Literatur wird immer wieder darauf hingewiesen, dass es keinen allgemeingültigen, für alle Probleme verwendbaren genetischen Algorithmus gibt. Aus diesem Grund können die in diesem Kapitel gewonnenen Ergebnisse nicht allgemeingültig auf andere Aufgaben übertragen werden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass mit den gewonnenen Erfahrungen und Ergebnissen ähnliche Aufgabenstellungen ohne wesentliche Veränderungen des Verfahrens schnell und mit hoher Trefferwahrscheinlichkeit gelöst werden können.

Durch die Vergleichsberechnungen in diesem Kapitel wird bestätigt, dass der modifizierte GA für eine Entwurfsoptimierung geeignet ist. Die gewonnenen Erfahrungen und Ergebnisse werden nun auf die Optimierung mehrgeschossiger Bürogebäude angewendet.

## 4 Entwurf von Bürogeschossbauten

### 4.1 Methodischer Ansatz zur Entwurfsoptimierung

Zur Durchführung einer ganzheitlichen Entwurfsoptimierung ist ein methodisches Vorgehen notwendig. Das in Kapitel 3 vorgestellte Basismodell ist allgemeingültig anwendbar, jedoch sind die Optimierungsvariablen und –kriterien von der jeweiligen Entwurfsaufgabe abhängig und es ist eine Anpassung, bzw. eine Ergänzung notwendig. Im folgenden wird das methodische Vorgehen erläutert und dann am Beispiel von Bürogeschossbauten angewendet.

Der erste und wichtigste Schritt ist eine Analyse der Entwurfsaufgabe, wobei festgestellt werden soll, ob eine Entwurfsoptimierung überhaupt möglich ist. Dazu sind folgende grundsätzlichen Überlegungen zu beachten:

- Infolge der vielen Randbedingungen und Einflüsse kann eine Entwurfsaufgabe weder vollständig beschrieben noch objektiv beurteilt werden. Daher ist eine Optimierung nur in Teilbereichen des Entwurfs möglich.
- Damit eine Entwurfsoptimierung dieser Teilbereiche möglich wird, müssen diese einen wesentlichen Teil des Entwurfsvolumens darstellen. Zusätzlich müssen sie durch ein mathematisches Modell beschrieben werden können und es dürfen nur objektive Beurteilungskriterien verwendet werden.
- Auch bei der Betrachtung von Teilbereichen ist die ganzheitliche Betrachtungsweise umsetzbar.

Im zweiten Schritt wird der ausgewählte Teilbereich genau analysiert. Dazu werden systematisch alle Entwurfparameter definiert, deren Ausführungsmöglichkeiten und Abhängigkeiten formuliert. Zusätzlich werden die Parameter in zwei unterschiedliche Kategorien, in konstante und variable Parameter eingeteilt. Konstante Parametern können bei der Optimierung nicht verändert werden. Im Gegensatz dazu sind die variablen Parameter veränderbar.

Nach der Parameterdefinition ist die Entwicklung eines mathematischen Modells erforderlich, mit dem die Entwurfslösung eindeutig beschrieben werden kann. Dazu sind Algorithmen zur Berechnung der Geometrie, für die statische Berechnung und zur Massenberechnung notwendig.

Für die Optimierung ist eine Zielfunktion notwendig, die den Fitnesswert bestimmt. Dazu ist es erforderlich, verschiedene Kriterien zu definieren und eine Verknüpfung zu dem Berechnungsmodell herzustellen.

Nach der Definition der Parameter und der Kriterien wird das Basismodell mit dem Anwendungsmodell verknüpft, entsprechend überarbeitet und in eine Anwendungssoftware integriert. Zusammenfassend werden fünf Einzelschritte dieser Vorgehensweise noch einmal zusammengestellt:

#### **Methodischer Ansatz zur ganzheitlichen Entwurfsoptimierung**

1. Analyse Bauaufgabe und Festlegung der zu optimierenden, repetitiven Teilbereichs
2. Systematische Erfassung und Definition aller Parameter und ihrer Abhängigkeiten
3. Allgemeine Beschreibung einer Entwurfslösung durch ein mathematisches Modell
4. Definition der Optimierungskriterien
5. Verknüpfung Basis- und Anwendungsmodell

## 4.2 Analyse Bürogeschossbauten

Bei einer Analyse im oben beschriebenen Sinne von modernen Büro- und Verwaltungsgebäuden stellt man fest, dass alle Entwürfe unabhängig von der Baukörperform und der städtebaulichen Anordnung auf dem Grundstück in Teilbereichen ähnlich ausgebildet sind. Büroflächen, die vertikal zu Geschosspaketen zusammengeführt werden, bilden den Grundmodul des Gesamtgebäudes. Dieser Grundmodul wird mit entsprechenden Kernen, Erschließungsstraßen etc. zu einem Gesamtkomplex zusammengefügt. Nachfolgend sind zwei Beispiele abgebildet, bei denen die Grundmodule deutlich ausgebildet sind.

Verwaltung HUK, Coburg

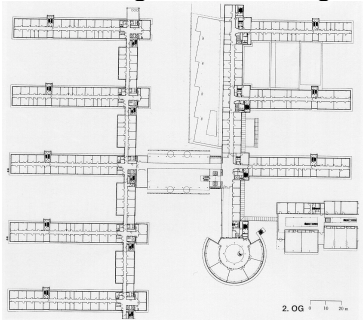


Abbildung 4-1: Grundriss

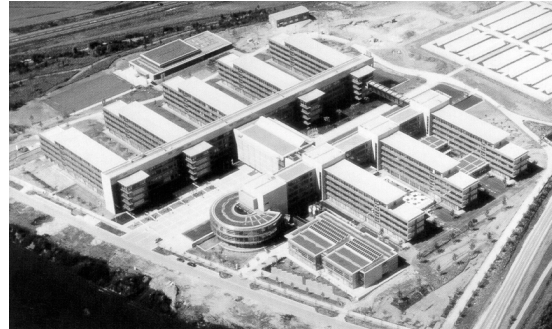


Abbildung 4-2: Ansicht

Bürohaus Kortmann, Nordkirchen

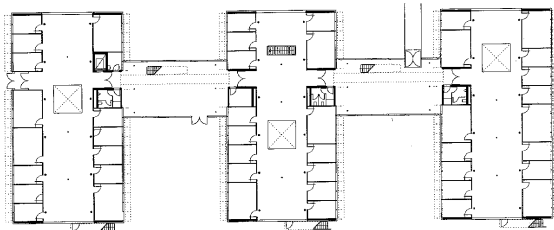


Abbildung 4-3: Grundriss



Abbildung 4-4: Ansicht

Die Grundmodule sind infolge der momentanen Arbeitsstruktur, der Arbeitsstättenverordnung, der Brandschutzvorschriften, der Abmessung der Einrichtungen und weiteren Normen und Vorschriften sehr ähnlich. Das bedeutet, dass jedes Bürogebäude aus einem oder mehreren Grundmodulen besteht, die über Kerne, Straßen, Höfe etc. zu einem Gesamtensemble zusammengefügt werden.

Die Anordnung der Erschließung und der notwendigen Nebenräume sind bei vielen Entwürfen ähnlich, das heißt, dass sich der eigentliche Entwurf mit zwei wesentlichen Teilen beschäftigt:

- der städtebaulichen Anordnung und der gegenseitigen Zuordnung der einzelnen Grundmodule
- dem eigentlichen Entwurf eines Grundmoduls.

Der unter Punkt 1 beschriebene Entwurfsteil unterliegt sehr vielen Freiheiten und vom Ort abhängigen Randbedingungen, so dass kein allgemeingültiges auf alle Fälle zutreffendes Modell entwickelt werden kann.

Da aber das gesamte Bauwerk größtenteils aus den Grundmodulen besteht und diese Module die Voraussetzungen für die erfolgreiche Anwendung einer Entwurfsoptimierung erfüllen, werden die weiteren Untersuchungen an einem allgemeinen Grundmodul durchgeführt. Zur eindeu-

tigen Beschreibung werden alle notwendigen Entwurfparameter definiert und die zugehörigen Abhängigkeiten hergeleitet.

### 4.3 Definition der Entwurfparameter und ihrer Abhängigkeiten

#### 4.3.1 Bürotyp

Die Bürotypen werden nach der unterschiedlichen Nutzung unterteilt. Hierbei spielen der Bedarf an Räumen verschiedener Größe, langfristig zu erwartende Nutzungsänderungen und Anforderungen an die Arbeitsumwelt eine große Rolle. Man unterscheidet nach Zellen-, Großraum-, Gruppen-, Kombi- und Revibüros.

##### 4.3.1.1 Zellenbüro

Das Zellenbüro ist der klassische Bürotyp für die Verwaltungsarbeit, welches in der Regel aus Ein-, Zwei-, Drei- und Vier-Personenräumen besteht. Die Raumgröße beträgt 12,0 bis 50,0 m<sup>2</sup>. Die Trennwände zwischen den zu Bündeln aufgereihten Räumen können flexibel oder fest sein.

##### 4.3.1.2 Gruppenbüro

Das Gruppenbüro ist eine Büroform, die hauptsächlich für Gruppenarbeit in der Größenordnung von 5 - 7 Personen verwendet wird. Diese Arbeitsgruppen können beliebig zusammengefügt und getrennt werden, so daß die Unterteilung in kleinere Gruppenräume notwendig werden kann. Kleine Gruppenräume können wie Zellenbüros natürlich belüftet werden, bei größeren Gruppenbüros ist eine unterstützende Klimatisierung notwendig. Die Aufteilung der Gruppenbüros in kleinere Einheiten ist in der Regel kein Problem, jedoch ist die Zusammenführung zum Großraum sorgfältig zu planen, damit keine Probleme hinsichtlich der Arbeitsumwelt entstehen.

##### 4.3.1.3 Großraumbüro

Durch Berücksichtigung starker interner Kommunikationsbeziehungen ist die Büro großform entwickelt worden. Großräume können 20, 50 100 und mehr Arbeitsplätze umfassen. Unter akustischen Gesichtspunkten sollte ein Großraum mindestens 20 x 20 = 400 m<sup>2</sup> haben. Beim Großraumbüro befindet sich ein Teil der Verkehrsflächen im Arbeitsraum selbst. Die Erschließung erfolgt immer direkt vom Kern aus über kurze Stich- bzw. Ringflure. Nachteile eines Großraumbüros sind die notwendige Klimatisierung, die künstliche Belichtung sowie die optische und akustische Transparenz.

##### 4.3.1.4 Kombibüro

Beim Kombibüro werden Einzelräume für ruhiges und ungestörtes Arbeiten mit einer innenliegenden Gemeinschaftszone verbunden. Die Gemeinschaftszone wird für Besprechung, Archivierung, Bibliothek, Aufenthalt, Teeküche, Besucherempfang etc. genutzt. Das Kombibüro ist aus einem Dreibund entwickelt, bei dem die außenliegenden Räume auf natürliche Weise belüftet und belichtet werden können. Die Innenzone kann je nach Bedarf durchgängig oder teilweise als Lichthof ausgebildet werden. Diese Büroform eignet sich besonders gut für Verwaltungen mit hohem Anteil an Einzelarbeit.

##### 4.3.1.5 Revibüro

Aus der Notwendigkeit, Einzelarbeitsräume mit Gruppenräumen und Großräumen zu mischen, entstand das reversible Büro, das Revibüro. Diese Art der Anwendung ist hauptsächlich bei Mietbürohäusern anzutreffen. Hier ist während der Planungszeit nicht geklärt, welche Bürostruktur die jeweiligen Mieter verlangen. Ebenfalls muss bei einem Mieterwechsel die Flächenaufteilung flexibel verändert werden können. Durch die geforderte hohe Flexibilität sind relativ

hohe technisch bedingte Baukosten anzusetzen, da die Erschließung, die Installation und die Außenwand alle möglichen Raumstrukturen zulassen sollen.

#### 4.3.2 Bürostruktur

Für die Entwurfsplanung eines Bürogebäudes und Festlegung der Bürostruktur gelten für das Normalgeschoss vom Gebäudetyp her unterschiedliche Entwurfsprinzipien. Die Entwicklung des normalen Bürogeschosses resultiert aus der Arbeits- und Kommunikationsstruktur des Nutzers. Bei Mietbüros muss das Raumsystem offen bleiben. Prinzipiell unterscheidet man in kleinräumige, großräumige und reversible Strukturen.

Kleinräumige Strukturen ohne Kommunikationszone können als Einbund (eine Büroachse und ein Flur) oder als Zweibund (zwei Büroachsen mit mittigem Flur) ausgeführt werden. Wird eine mittige Kommunikationszone angeordnet, so entsteht ein Dreibund oder ein Kombibüro.

Kombibüros haben eine offene, variable Kommunikationszone in der Mitte und kleine Arbeitszellen am Rand, die eine Rückzugsmöglichkeit für konzentrierte Arbeiten schaffen.

Großräumige Strukturen bestehen aus mittelgroßen bis geschossgrößen Räumen zur Unterbringung von 5 oder mehr Personen in einer Nutzungseinheit. Aus heutiger Sicht besteht kein Bedarf mehr an großräumigen Bürolandschaften, da es darin für die Menschen keine Möglichkeit zum Rückzug und zum konzentrierten Arbeiten mehr gibt.

Reversible Strukturen lassen sowohl kleinräumige als auch großräumige Strukturen zu und ermöglichen eine flexible Nutzung eines Geschosses. Bei Mietobjekten, bei denen die Mieter nicht feststehen und auch mit einem Mieterwechsel zu rechnen ist, sind solche Strukturen geeignet. Bei größeren Objekten ist es nicht notwendig, ein Gebäude vollreversibel zu entwerfen, da es immer einen Bedarf nach Hierarchiestufen oder Sonderfunktionen für kleine Räume geben wird.

Eine allgemeine Grundstruktur für ein reversibles Flächenmodul ist nach [29] in Abbildung 4-5 dargestellt. Dieses Flächenmodul weist eine ausreichende Flexibilität auf und ist in vielen gebauten Objekten wiederzufinden.

Für das reversible Geschossmodul wird allgemein eine Breite von 15 m angesetzt.

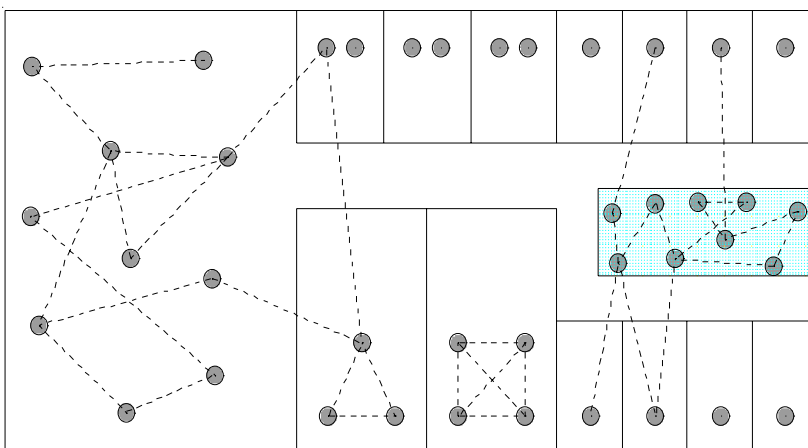


Abbildung 4-5: Reversible Bürostruktur



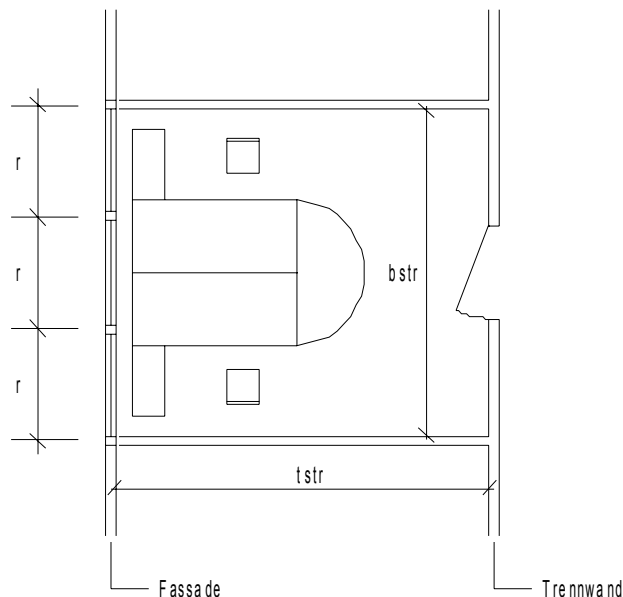
Die Verknüpfung von Bürotyp und Bürostruktur ist in folgender Tabelle dargestellt.

<u>Bürostruktur</u> Bürotyp	Einbund	Zweibund	Dreibund	Großraum	Kombibüro	Revibüro
Zellenbüro	X	X	X		X	
Gruppenbüro	X	X	X		X	
Großraumbüro				X		
Kombibüro					X	
Revibüro						X

*Tabelle 4-1: Zuordnungsmatrix Bürostruktur-Bürotyp*

#### 4.3.3 Definition Standardbüro

Die für den Entwurf von Büro- und Verwaltungsbauten wichtigsten Entwurfparameter sind die Vorgaben für das Standardbüro. Es wird davon ausgegangen, dass bei der flexiblen Einteilung von Geschossgrundrissen und bei verschiedenen Bürogrößen alle Grundrisse von einem Standardraum, dem Standardbüro abgeleitet werden. Dies begründet sich in der Tatsache, dass für eine Fassadengestaltung ein durchgängiges Raster in Gebäudelängsrichtung erwünscht ist. Somit wird das Fassadenraster als kleinstes Modul der Raumbreite definiert. Die Raumbreite setzt sich aus einem ganzzahligen Vielfachen des Fassadenrasters abzüglich der Dicke der Trennwand zusammen.



*Abbildung 4-6: Definition Breite Standardraum in Abhängigkeit von Fassadenraster und Trennwanddicke*

Weiterhin ergeben sich durch Addition mehrerer Standardbüros größere Raumeinheiten, die in verschiedenen Kombinationen zu einem Bürogeschoss zusammengefügt werden können. Dadurch begründet sich ebenfalls die Ableitung des Geschossmoduls von dem Standardbüro.

Die Parameter des Standardbüros sind im folgenden aufgelistet:

1. Berechnungsart
  - 1.1. Berechnung Standardraum über Fläche und Raumtiefe.  
Die Raumtiefe ist frei definierbar oder kann aus verschiedenen Modulen in Abhängigkeit der Möblierung zusammengesetzt werden. Es wird in diesem Zusammenhang ein Ansatz gewählt, dass die erforderliche Fensterhöhe, die für eine möglichst natürliche Belichtung notwendig ist, in Abhängigkeit der Raumtiefe berechnet wird. Das bedeutet, dass in diesem Fall die Raumtiefe die bestimmende Variable ist und die lichte Raumhöhe davon abhängt (siehe hierzu auch Kapitel 4.3.8).
  - 1.2. Berechnung Standardraum über Fläche und Raumbreite  
Die Raumbreite ist frei definierbar oder kann aus vordefinierten Breiten in Abhängigkeit der Möblierung zusammengesetzt werden.
  - 1.3. Berechnung Standardraum über Fläche und Rastergrundmaß.  
In diesem Fall sind Raumbreite und -tiefe variabel. Es besteht jedoch eine Abhängigkeit zwischen Raumbreite und Rastergrundmaß derart, dass die Raumbreite inklusive der Trennwanddicke gleich n-mal dem Rastergrundmaß entspricht (vgl. Abbildung 4-6).
2. Raumdefinition
  - 2.1. Vorgabe Fläche Standardraum
  - 2.2. Vorgabe Gesamtfläche pro Arbeitsplatz. Mit Hilfe dieses Parameters wird bei Kombibüros die notwendige Breite der Gemeinschaftszone berechnet (siehe hierzu Kapitel 4.5).
  - 2.3. Arbeitsplätze pro Standardraum. Bei 1–2 Arbeitsplätzen wird von einer einreihigen Anordnung, bei 3–4 Arbeitsplätzen von einer zweireihigen Anordnung der Arbeitsplätze ausgegangen. Dies hat einen direkten Einfluss auf die Berechnung der Fensterhöhe (siehe Kapitel 4.3.8).
3. Organisation Geschossmodul und Grundmodul
  - 3.1. Für die Organisation des Geschossmoduls werden die maximale Anzahl der Standardbüros pro Geschoss vorgegeben.
  - 3.2. Für die Organisation des Grundmoduls wird die maximale Anzahl der geforderten Standardbüros vorgegeben, wobei die Anzahl ein ganzzahliges Vielfaches der Standardbüros pro Geschossmodul ist.
4. Lichte Raumhöhe
  - 4.1. Maximale Raumgröße zur Berechnung der lichten Raumhöhe in Abhängigkeit der Arbeitsstättenverordnung.
  - 4.2. Direkte Eingabe einer gewünschten lichten Raumhöhe, die obige Bedingung erfüllt.

Bei Vorgabe eines Raumprogramms mit verschiedenen Bürogrößen sind die von den Standardbüros abweichenden Räume für die Planung in Standardbüros umzurechnen. So werden beispielsweise zwei Räume, die jeweils 1,5 mal so groß sind wie ein Standardbüro, in der weiteren Planung in drei Standardbüros umgerechnet.

#### 4.3.4 Raster

Für die Rasterung eines Entwurfes sind zwei Parameter zu bestimmen. Das sind das Rastergrundmaß und die Rasterart.

Unter dem Rastergrundmaß versteht man den Abstand zweier benachbarter Rasterachsen.

Es werden zwei verschiedene Rasterarten unterschieden, nämlich das Ausbau- und Konstruktionsraster. Das Ausbauraster bestimmt die Lage des Innenausbaus. Im wesentlichen ist das die

Anordnung der Innenwände und die Fassadengliederung. Das Konstruktionsraster bestimmt die Lage der Konstruktion. Die Rasterart beschreibt die Anordnung dieser beiden Raster in ihrer Grundrisslage zueinander. Ausbau- und Konstruktionsraster können entweder getrennt (siehe Abbildung 4-7) oder deckungsgleich (siehe Abbildung 4-8) ausgeführt werden.

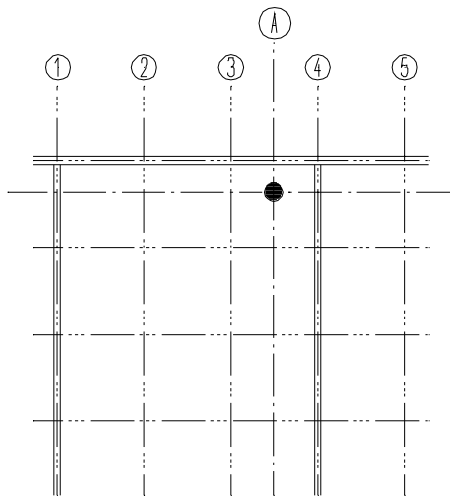


Abbildung 4-7: A-K Raster getrennt

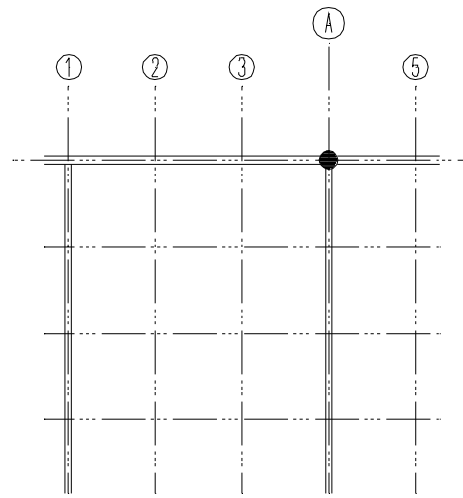


Abbildung 4-8: A-K Raster deckungsgleich

Im allgemeinen wird davon ausgegangen, dass das Geschossmodul in Längsrichtung gerastert wird. Diese Rasterung ist eine Hilfe beim Entwurf der Büroräume sowie bei der Fassadengestaltung. Eine Rasterung in Gebäudequerrichtung wird nicht vorgegeben, sondern ist nur bei einer Anordnung von elementierten Trennwänden erforderlich (siehe hierzu Kapitel 4.3.5, Trennwände). Gängige Rastermaße sind 1.20 m, 1.25 m, 1.30 m, 1.35 m, 1.40 m und 1.50 m. Im Modell werden beliebige Rastermaße zwischen 1,00 m und 2,00 m zugelassen.

#### 4.3.5 Trennwände

Die Art der Trennwände ist für den Entwurf ebenfalls von Bedeutung. Entwurfsbestimmend sind dabei der Trennwandtyp, die Trennwanddicke und die aus der Trennwand resultierende zusätzliche Verkehrslast.

Es werden drei verschiedene Trennwandtypen unterschieden:

- gemauerte leichte Trennwände
- Holz-, Metallständerwände
- Elementtrennwände.

Die Trennwanddicke bei gemauerten leichten Trennwänden wird näherungsweise mit  $d = 15 \text{ cm}$  (inklusive Putz) angenommen. Als zusätzliche Verkehrslast wird eine Flächenlast von  $\Delta p = 1,25 \text{ kN/m}^2$  berücksichtigt.

Bei Holz- und Metallständerwänden ist die Trennwanddicke variabel. Die Verkehrslast wird entsprechend dem Flächengewicht der Trennwand nach DIN 1055, Teil 3 ermittelt. Unbelastete Trennwände werden bei einem Flächengewicht von  $g \leq 100 \text{ kg/m}^2$  mit  $\Delta p = 0,75 \text{ kN/m}^2$  und bei einem Flächengewicht von  $g \leq 150 \text{ kg/m}^2$  mit  $\Delta p = 1,25 \text{ kN/m}^2$  berücksichtigt.

Bei den Elementtrennwänden werden gängige Typen vorgeschlagen sowie eine Option für weitere Typen zur Verfügung gestellt.

Alle Trennwandtypen wirken sich auf die Verkehrslast und auf die Geometrie des Geschossmoduls aus. Weitere Auswirkungen ergeben sich nur bei den Elementtrennwänden. Hierbei ist ein Rastergrundmaß von  $r = 1,20 \text{ m}$  oder  $r = 1,25 \text{ m}$  erforderlich und es ist ein getrenntes Ausbau- und Konstruktionsraster notwendig. Zusätzlich muss der Geschossmodul in Längs- und Quer-

richtung gerastert werden. Für einen ausreichenden Deckenanschluss der Elementtrennwände ist eine abgehängte Decke vorzusehen. Auf die abgehängte Decke kann bei sichtbarer Installation und bei einer Flachdeckenkonstruktion verzichtet werden.

Neben den vorgegebenen Trennwandtypen wird eine Datenbank erstellt, in der beliebige Trennwandtypen gespeichert werden können. Die zur Beschreibung notwendigen Parameter sind Trennwanddicke, Trennwandzuschlag (gemäß DIN 1055, Teil 3) und Einheitspreis je m<sup>2</sup> Trennwand.

#### 4.3.6 Fassadentyp

Gängige Fassadentypen sind:

- Lochfassade
- Bandfassade
- vorgehängte Fassade.

Bei Anordnung einer Lochfassade wird die Fassade als tragende Außenwand mit einer Dicke von  $d_{sta} = 25$  cm angenommen, wobei kein durchgängiges Garagensystem (siehe hierzu Kapitel 4.1.11, Tiefgarage) möglich ist.

Infolge einer Bandfassade sind ebenfalls mehrere Einschränkungen zu berücksichtigen. So ist ein Tragsystem mit Randunterzügen, die als Brüstungsträger ausgebildet werden, zu wählen. Diese Art der Fassade wird vorzugsweise bei einer Betonfertigteilmontage verwendet. Die Anordnung einer vorgehängten Fassade, die an den Geschossdecken befestigt ist, hat keine Auswirkung auf die Tragkonstruktion.

Im Zusammenhang mit der Untersuchung von Skelettbauten werden nur vorgehängte bzw. Elementfassaden untersucht. Vereinfachend werden für das Modell Pfosten-Riegel-Fassaden angenommen.

Wesentliche Einflussparameter der Fassade auf die Berechnung sind zum einen das Fassadengewicht, welches in entsprechende Randträger eingeleitet werden muss bzw. welches als Belastung der Randträger berücksichtigt werden muss. Weitere Parameter sind die Herstellungskosten der Fassade sowie die bauphysikalischen Werte. Diese werden für Energiebetrachtungen und für eine Heizkostenberechnung benötigt. Da viele verschiedene Fassadentypen existieren, werden diese Parameter in einer programmeigenen Datenbank gespeichert. Somit können diese Daten beliebig verändert und ergänzt werden.

#### 4.3.7 Stellung der Außenstütze

Die Stellung der Außenstütze beeinflusst in großen Maß die Geometrie des Geschossmoduls, das statische System und damit alle weiteren Berechnungen.

Dieser Parameter nimmt daher eine wichtige Stellung bei der Entwurfbearbeitung ein. Um alle Möglichkeiten ausreichend zu beschreiben sind folgenden Variablen notwendig:

- Stützenstellung außen:  
Diese Variable beschreibt die prinzipielle Anordnung der Außenstütze in Bezug auf die Fassade. Es sind folgende Stützenstellungen möglich:
  - 1 Stütze im Innenraum,
  - 2 Stütze innen an der Fassade,
  - 3 Stütze in der Fassade.
  - 4 Stütze außen an der Fassade,
  - 5 Stütze vor der Fassade
- Abstand Außenstütze Fassade [astaf]:  
In Abhängigkeit der Stützenstellung außen wird der Abstand zwischen Stütze und Fassade als Hilfsvariable für die Geometrieberechnung definiert.

- Dicke Außenstütze [dsta]:  
Für die Berechnung der Gebäude- und Tragwerksgeometrie ist die Dicke der Außenstütze notwendig. Vereinfachend wird die Dicke der tragenden Außenwand mit  $d_{sta} = 25 \text{ cm}$  und die Dicke der Außenstütze mit  $d_{sta} = 30 \text{ cm}$  festgelegt.
- Stützenfaktor Außenstütze [stafac]:  
Hilfsvariable zur Berücksichtigung der Stützenstellung
- Längenanteil Fassade: [lfas]

Allgemein lässt sich der Längenanteil der Fassade wie folgt berechnen:

$$lfas = dsta \cdot stafac + astaf \quad (Gl. 4-1)$$

Das Vorzeichen des Stützenfaktors wird bei innenliegender Stütze negativ und bei außenliegender Stütze positiv definiert.

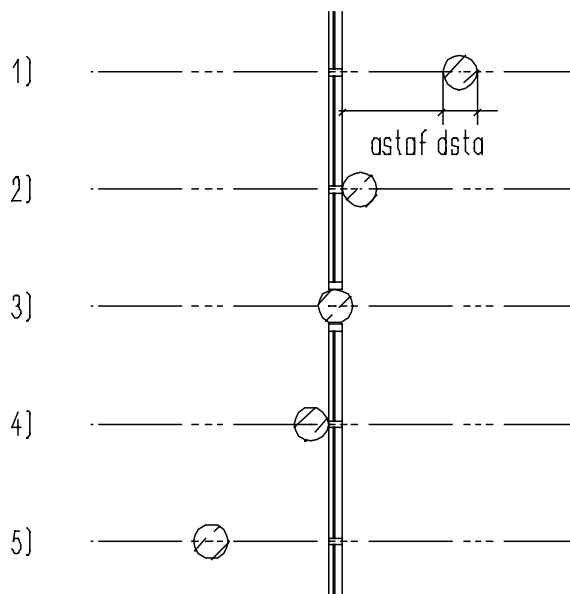


Abbildung 4-9: Stellung der Außenstütze

Die Stellung der Außenstütze ist von der Fassaden-, der Deckenkonstruktion und der Bauweise abhängig. Daher ist eine Anordnung der Außenstützen im Innenraum bei vorgehängten Fassaden und einer Betonkonstruktion nur in zwei Fällen möglich:

- bei einer Flachdecke
- bei einer Deckenkonstruktion mit Unterzügen, wenn diese in Gebäudequerrichtung, also senkrecht zur Fassade angeordnet sind.

Die Anordnung der Außenstütze im Innenraum ist bei der Verbundbauweise ebenfalls nur in zwei Fällen möglich:

- bei gestapelter Trägerlage kann die Außenstütze im Innenraum angeordnet werden.
- bei Trägern in Gebäudequerrichtung (senkrecht zur Fassade) ist eine innenliegende Stützenanordnung nur möglich, wenn die Träger durchlaufen und die Stützen geschoßweise gestoßen werden.

Da die gestapelte Trägerlage zu einer großen Konstruktionshöhe führt und die geschoßhohen Stützen unnötig viele Anschlüsse erfordern, werden für Verbundkonstruktionen keine innenliegenden Außenstützen zugelassen.

#### 4.3.8 Fensterhöhe

Infolge umweltfreundlicher und energiesparender Planungen sollen bei modernen Bürobauten die Standardbüroräume natürlich belichtet werden können. Aus diesem Grund wird die Variable Fensterhöhe eingeführt. Unter der Fensterhöhe versteht man im Regelfall den Abstand von Oberkante Fertigfußboden bis Unterkante des oberen Fensterrahmens. Wird eine Deckenkonstruktion mit Unterzügen in Gebäudelängsrichtung und Außenstützen im Innenraum gewählt, dann wird die Fensterhöhe als Abstand zwischen OK Fertigfußboden und UK Unterzug definiert. Somit hat die Fensterhöhe einen Einfluss auf die Geschosshöhe. Eine weitere Abhängigkeit besteht zwischen Fensterhöhe und lichter Raumhöhe. Infolge des Ansatzes einer natürlichen Belüftung muss die lichte Raumhöhe mindestens gleich der Fensterhöhe sein. Die Definition der Fensterhöhe ist für den Regelfall in Abbildung 4-10 dargestellt. Damit die Fensterhöhe unabhängig von der Fassadenkonstruktion berechnet werden kann, werden nur die Innenmaße verwendet. Der daraus entstehende Fehler in der Bürotiefe ist klein und wird daher vernachlässigt.

Nach DIN 5034 ist bei Kleinräumen ein Fensteranteil von 0,6 bis 0,8 m<sup>2</sup> und bei Gruppenräumen ein Fensteranteil von 0,4 bis 0,6 m<sup>2</sup> notwendig. Diese Angaben beziehen sich auf die Fläche des betrachteten Raumes. In Abhängigkeit der Anzahl der Arbeitsplätze pro Büro und der Bürotiefe  $t_{str}$  [m] werden vereinfachend folgende Ansätze zur Berechnung der erforderlichen Fensterhöhe angenommen:

Bei 1 bis 2 Arbeitsplätzen 
$$h_{Fenster} = \frac{t_{str}}{1,5} \quad (Gl. 4-2)$$

Bei 3 bis 4 Arbeitsplätzen 
$$h_{Fenster} = \frac{t_{str}}{2,0} \quad (Gl. 4-3)$$

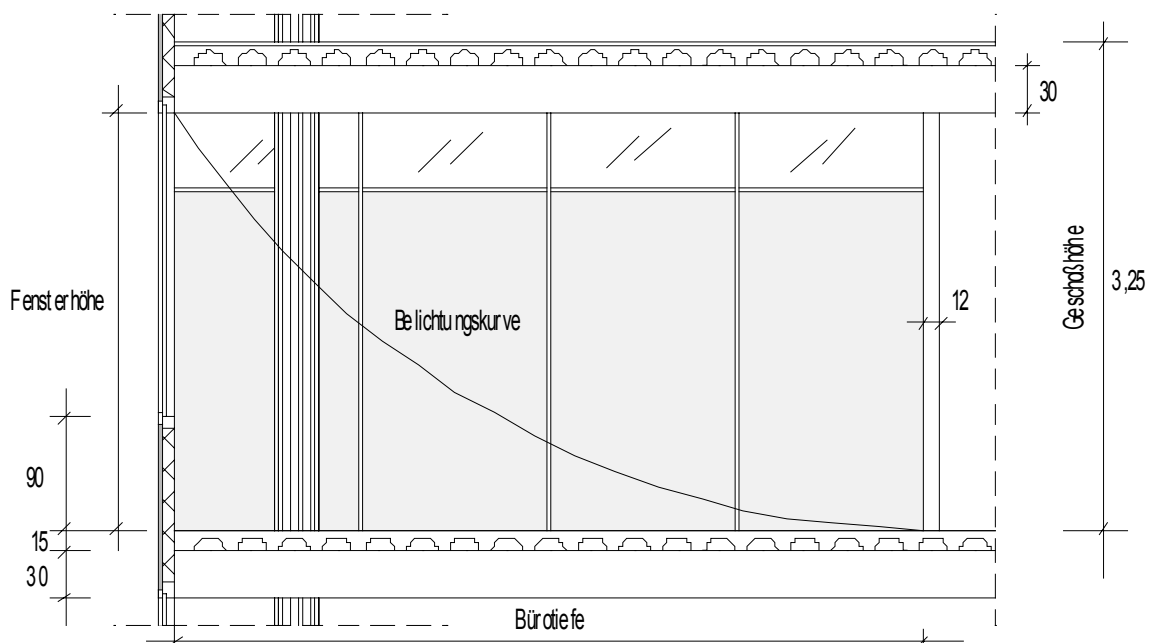


Abbildung 4-10: Abhängigkeit Fensterhöhe von Raumtiefe

### 4.3.9 Installation

#### 4.3.9.1 Elektroinstallation

Die Elektroinstallation spielt im Bürobau mittlerweile eine große Rolle. Man unterscheidet in Stark- und Schwachstrominstallation. Mit Schwachstrominstallation sind die Installationseinrichtungen für Telekommunikation und Datentransfer gemeint. Da die meisten Büroarbeitsplätze mit Rechnern ausgestattet und an bürointerne und externe Datennetze angeschlossen sind, ist eine vorausschauende Planung der erforderlichen Installationsführungen notwendig.

Unter der Starkstrominstallation versteht man die Strominstallation für Belichtung, Bürogeräte, Küchengeräte etc..

Prinzipiell sind drei Arten der Installationstrassierung möglich. Bei Aufreihung vieler kleiner Zellenbüros ist ein unterhalb der Fenster verlaufender Kabelkanal eine vernünftige Lösung. Bei größeren Räumen und flexibler Nutzung dieser Räume sowie geforderter Zugänglichkeit der Installationsleitungen für spätere Nach- oder Umrüstungen ist eine Verlegung der Installation im Fußboden sinnvoll. Der Fußboden kann in diesem Fall als Doppel- oder Hohlraumfußboden, sogar als Mischung dieser beiden Lösungen ausgeführt werden (siehe hierzu auch Kapitel 4.3.11, Fußbodenaufbau).

Die Elektroinstallation kann darüber hinaus auch in Kabelkanälen verlaufen, die von der Decke abgehängt werden. Die Anschlüsse werden durch Stichleitungen in den Trennwänden versorgt. Da dann eine abgehängte Decke notwendig wird und nur eine eingeschränkte Flexibilität für Umstrukturierungen der Räume vorhanden ist, wird diese Option nicht weiter verfolgt.

#### 4.3.9.2 Heizungs-, Lüftungsinstallation

Sofern die Heizungsinstallation nicht mit einer lufttechnischen Anlage gekoppelt ist, wird davon ausgegangen, dass kein zusätzlicher Raum- und Platzbedarf für Heizkörper und Leitungsführung entsteht.

Bei Anordnung von lufttechnischen Anlagen, die mit einem Heizsystem gekoppelt sein können, hat die Installationsführung einen wesentlichen Einfluss auf die Geschosshöhe.

Die Lüftungsinstallation kann im wesentlichen auf drei verschiedene Arten ausgeführt werden:

- Installationsführung unterhalb der Decke:  
Die Trassierung wird an die Konstruktion angepasst, so dass nur wenige Durchbrüche durch die Unterzüge (Träger) notwendig werden.
- Installationsführung unterhalb der Unterzüge (Träger):  
Diese freie Trassierung erfordert keine Durchbrüche. Zur Verkleidung der Leitungen wird in der Regel eine abgehängte Decke angeordnet, welche die Berechnung der Geschosshöhe beeinflusst.
- Installationsführung im Fußboden.

Für den Entwurf sind die Lage der Installation, der Raumbedarf und der maximale Rohrdurchmesser der Installation von Bedeutung.

Bei einer Installationsführung unterhalb der Decke mit Trägerdurchbrüchen dürfen die Durchbrüche nicht beliebig groß werden. Werden die Trägerhöhen infolge einer Berechnung  $< 40$  cm, so sind Durchbrüche nicht mehr sinnvoll und werden daher im Modell nicht zugelassen. In diesem Fall muss die Installation unterhalb der Deckenkonstruktion bzw. in einer geeigneten Art parallel zu den Unterzügen verlaufen.

Weiterhin ist es von Bedeutung, ob eine untergehängte Decke angeordnet wird oder nicht. Wird auf eine untergehängte Decke verzichtet, was aus Gründen der Wärmespeicherfähigkeit der Decke sinnvoll sein kann, dann bleibt die Installationsführung sichtbar. Die Installation hat dann keinen weiteren Einfluss auf die Berechnung der lichten Raumhöhe.

Die Anordnung der Lüftungsinstallation im Fußboden hat den Vorteil, dass die Deckenkonstruktion unabhängig von der Installation ist. Allerdings muss ein Doppelfußboden vorgesehen wer-

den, der ausreichend Platz für die erforderliche Installation  $[h_i]$  bietet (siehe hierzu Kapitel 4.3.11, Fußbodenaufbau). In diesem Fall berechnet sich die Höhe des Fußbodenaufbaus zu:

$$h_f = h_i + 5 \text{ cm} \quad (\text{Gl. 4-4})$$

Hierbei wird eine durchschnittliche Konstruktionshöhe der Fußbodenpaneele von 5 cm angenommen. Eine Unterdecke ist bei einer Fußbodeninstallation nicht notwendig.

Moderne Bürogebäude werden mittlerweile so geplant, dass auf eine künstliche Belüftung weitestgehend verzichtet werden kann.

#### 4.3.10 Unterdecken / abgehängte Decken

Sofern Unterdecken oder abgehängte Decken eingebaut werden, können diese in verschiedenen Ausführungen eingebaut werden. Die wesentlichen Deckensysteme sind [24]:

- Fugenlose Deckenbekleidungen und Unterdecken
- Ebene Deckenbekleidungen und Unterdecken
- Waben- und Pyramidendecken
- Integrierte Unterdeckensysteme

Für das Modell lassen sich die Unterdecken ausreichend durch zwei Parameter, Unterdeckentyp und Konstruktionshöhe der Unterdecke, beschreiben. Über die Variable Unterdeckentyp wird gesteuert, welches Unterdeckensystem verwendet wird bzw. ob überhaupt eine Unterdecke eingebaut wird. Der Abstand zwischen UK Decke und OK Unterdecke wird entweder durch den Höhenbedarf der Lüftungsinstallation oder über die Höhe der Unterzüge bestimmt. Bei Unterzügen wird angenommen, dass die abgehängte Decke direkt unterhalb der Unterzüge angebracht werden kann.

Der wesentliche Einfluss der Unterdecke auf den Gesamtentwurf liegt in der Auswirkung der Konstruktionshöhe der Unterdecke auf die Geschosshöhe und somit auf die Gesamthöhe des Gebäudes.

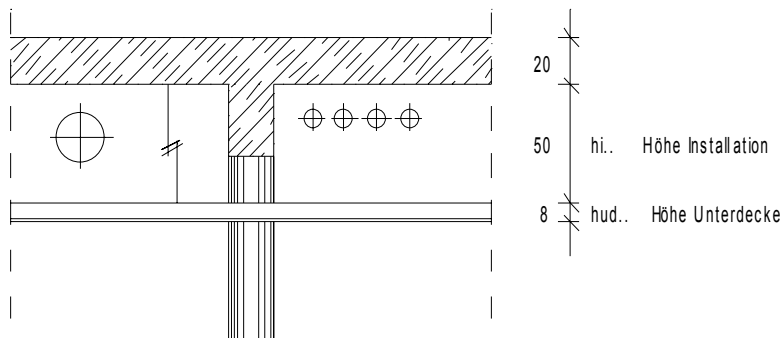


Abbildung 4-11: Systemskizze abgehängte Decke

#### 4.3.11 Fußbodenaufbau

Es werden prinzipiell drei verschiedene Typen von Fußböden, die bei Bürobauten eingesetzt werden, unterschieden [24]:

- Estrichfußboden      Höhe = 10 cm
- Hohlraumfußboden    Höhe = 7 – 30 cm
- Doppelfußboden      Höhe = 7 – 125 cm



Der Einfluss auf die Gebäudegeometrie beschränkt sich auf die Geschosshöhe. Somit können die verschiedenen Fußbodentypen mit Hilfe der Fußbodenhöhe ausreichend beschrieben werden.

Hohlraumböden sind nur bis zu einer Höhe von ungefähr 300 mm ausführbar. Aus diesem Grund wird festgelegt, dass keine Lüftungsinstallation im Hohlraumboden verlegt werden kann. Doppelfußböden hingegen können über einen Meter hoch eingebaut werden, so dass eine entsprechende Installationsführung möglich ist. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Mischung von Hohlraum- und Doppelboden. Hierbei lassen sich die Vorteile des Doppelbodens (hohe Flexibilität, problemlose Nachrüstbarkeit) und des Hohlraumbodens (guter Schallschutz zu Nebenräumen, preiswerter als Doppelboden, ausreichende Flexibilität) kombinieren. Bei der Kopplung wird der Doppelboden in Gassen verlegt, deren Breite ein Vielfaches des Doppelbodenrasters von 60 cm betragen.

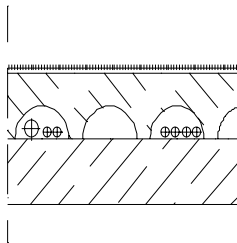


Abbildung 4-12: Hohlraumboden

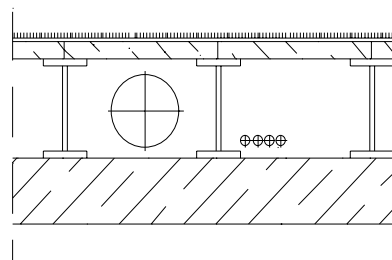


Abbildung 4-13: Doppelboden

#### 4.3.12 Lichte Raumhöhe

Die erforderliche minimale lichte Raumhöhe berechnet sich nach der Arbeitsstättenverordnung in Abhängigkeit der Fläche des größten Raumes. Zusätzlich dazu kann die lichte Raumhöhe als freie Variable eingegeben werden. Es ist dabei zu berücksichtigen, dass die Mindesthöhe nach Arbeitsstättenverordnung eingehalten wird.

	$H_{lr} \text{ [m]}$
$A_{max} \leq 50 \text{ m}^2$	2,50
$50 < A_{max} \leq 100 \text{ m}^2$	2,75
$100 < A_{max} \leq 2000 \text{ m}^2$	3,00
$A_{max} > 2000 \text{ m}^2$	3,25

Tabelle 4-2: Lichte Raumhöhe in Abhängigkeit der maximalen Raumgröße

#### 4.3.13 Tiefgarage

Die Anordnung einer Tiefgarage unterhalb des Bürogebäudes hat weitreichende Folgen. Nicht nur dass die Tiefgarage die mögliche Stützenstellung der Normalgeschosse bestimmt, sondern sie hat auch einen Einfluss auf die Anordnung der verschiedenen Baukörper zueinander. Bei der Anordnung einer Tiefgarage über das gesamte Baugelände ist klar, dass sich die einzelnen Gebäudeteile in ihrer Ausdehnung und ihrer Anordnung dem Tiefgaragenraster unterordnen müssen. Ist diese Unterordnung nicht gewünscht, so folgt das Tiefgaragenraster der Tragstruktur der Normalgeschosse und es entsteht eine unwirtschaftliche Tiefgarage mit wenigen Stellplätzen. Andernfalls sind umfangreiche Abfangmaßnahmen notwendig, um die Tragstruktur der Normalgeschosse auf die Tragstruktur der Tiefgarage abzuleiten.

Bei einer senkrechten Anordnung der Stellplätze zur Fahrgasse können die meisten Stellplätze pro Fläche untergebracht werden. Da das Parkplatzproblem immer größer wird, kann man es sich in der Zukunft nicht mehr leisten, leichtfertig Parkraum zu vergeben. Aus diesem Grund werden hier nur Tiefgaragensysteme mit senkrechter Anordnung der Stellplätze untersucht.

Bei der Anordnung einer Tiefgarage sind zwei wesentliche Garagensysteme denkbar:

- Ein durchgehendes Garagensystem unterhalb mehrerer Gebäude.
- Die Tiefgarage wird nur unterhalb des Gebäudes gebaut.

Bei einem durchgehenden Garagensystem kann die Fahrgasse parallel oder senkrecht zur Gebäudeachse angeordnet werden. Somit ist die Baukörperausrichtung ein weiterer Entwurfsparemeter. Bei einer Fahrgassenanordnung parallel zum Baukörper können die Stützen nah, d. h. die Vorderkante der Stütze entspricht der Begrenzung der Fahrgasse, oder im Parkbereich angeordnet werden. Die Stützenabmessungen werden zu  $b = 30$  cm und  $h = 50$  cm angenommen. Die Abmessungen sind bei einer Berechnung entsprechend zu überprüfen und gegebenenfalls zu ändern. Ist die Fahrgasse senkrecht zum Gebäude angeordnet, so besteht die Möglichkeit, die Stützenabstände zwischen den Stellplätzen konstant auszubilden oder aber zwei benachbarte Stützenabstände um ein oder zwei Stellplätze zu variieren. Dieses Breitenverhältnis wird ebenfalls über einen Parameter gesteuert.

Bei allen oben beschriebenen Möglichkeiten kann die Stellplatzbreite aus drei, in der Garagenverordnung vorgeschriebenen, Varianten gebildet werden.

- |                    |   |                          |
|--------------------|---|--------------------------|
| ▪ Stellplatzbreite | $b_{\text{stp}} = 2,50$ m, Fahrgassenbreite | $b_{\text{fg}} = 5,50$ m |
| ▪ Stellplatzbreite | $b_{\text{stp}} = 2,40$ m, Fahrgassenbreite | $b_{\text{fg}} = 6,00$ m |
| ▪ Stellplatzbreite | $b_{\text{stp}} = 2,30$ m,                  |                          |
| an der Stütze      | $b_{\text{stp}} = 2,40$ m, Fahrgassenbreite | $b_{\text{fg}} = 6,50$ m |

Diese definierten Tiefgaragenparameter haben wesentliche Auswirkungen auf das Konstruktionsraster der Obergeschosse und beeinflussen damit ganz wesentlich den Entwurf.

#### 4.3.14 Stützenstellung der Innenstütze

Neben der Anordnung der Außenstütze ist die Anordnung der Innenstütze(n) ebenfalls von großer Bedeutung für das Grundmodul. Die Stellung der Innenstütze ist von der Anzahl der Konstruktionsachsen in Gebäudequerrichtung abhängig. Bei drei Achsen kann die Innenstütze symmetrisch, d. h. in der Mitte des Gebäudequerschnitts, und asymmetrisch, am inneren Rand des Flures angeordnet werden.

Bei vier Achsen in Gebäudequerrichtung sind fünf verschiedene Möglichkeiten der Stützenstellung denkbar.

- Innenstütze im Flur vor der Trennwand
- Innenstütze in der Schrankwand
- Innenstütze in der Trennwandachse
- Innenstütze auf der büroabgewandten Flurseite (nur bei Dreibund und Kombibüros)
- Innenstütze im Büro vor der Trennwand

Die entsprechenden Entwurfsparemeter sind die Dicke der Innenstütze und im ersten und letzten Fall Abstand der Stütze von der Trennwand.

Die Dicke der Innenstütze wird vereinfachend mit 30 cm angenommen. Bei Elementtrennwänden ist ein getrenntes Ausbau- und Konstruktionsraster vorzusehen, so dass die Innenstütze um ein halbes Rastermaß versetzt zur Trennwand steht. In allen anderen Fällen kann der Abstand der Innenstütze von der Trennwand frei gewählt werden. Bei der Anordnung einer Schrankwand wird die Tiefe der Schrankwand zur Bürotiefe dazugezählt.

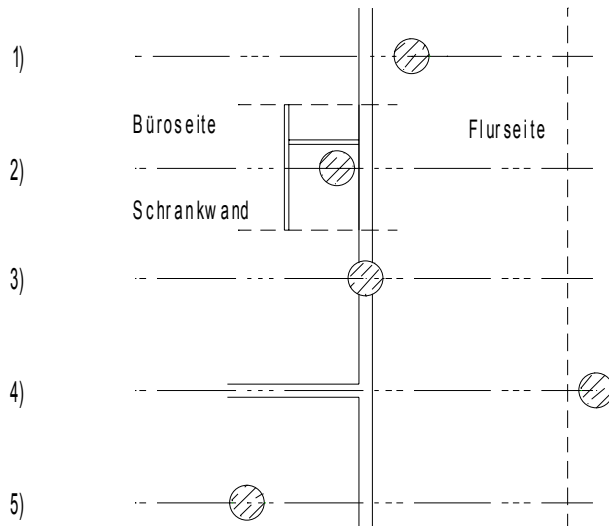


Abbildung 4-14: Stützenstellung der Innenstütze bei vier Achsen in Gebäudequerrichtung

#### 4.3.15 Tragwerk

Bei der Entwicklung einer Tragwerkslösung wird davon ausgegangen, dass der aus mehreren Geschossmodulen bestehende Baukörper an Kerne oder aussteifende Scheiben stößt, die für eine ausreichende Aussteifung sorgen. Die horizontale Lastabtragung erfolgt durch die Scheibenwirkung der Deckenkonstruktion in die aussteifenden Kern- bzw. Wandscheiben.

Das Tragsystem für diesen Baukörper lässt sich mit Hilfe von drei Parametern entwickeln und beschreiben.

- Bauweise
- Stützenstellung
- Deckenkonstruktion

##### 4.3.15.1 Bauweise

Herstellungsart und Fügechnik verschiedener Materialien können als Bauweise beschrieben werden. Mit der Wahl der Bauweise entscheidet man sich für ein bestimmtes Material und ein bestimmtes Herstellungsverfahren.

Es werden vier verschiedenen Bauweisen definiert, die im Bürobau ihre Anwendung finden.

- Ortbeton mit tragender Außenwand und Innenstützen
- Ortbetonskelett
- Betonfertigteilskelett
- Stahlverbundskelett

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Bauweisen Ortbetonskelett und Verbundskelett miteinander verglichen. Die verbleibenden Bauweisen haben keinen Einfluss auf die Zielsetzung dieser Arbeit und werden daher nicht weiter entwickelt. Sie können durch eine Erweiterung des Programmmoduls problemlos nachträglich integriert werden,

Die Bauweise hat eine Auswirkung auf die Wahl der Stützenstellung und die Deckenkonstruktion. Bei den hier betrachteten Bauweisen Ortbeton- und Stahlverbundskelett werden nachfolgende Annahmen getroffen.

- Einachsig gespannte Decken werden bei der Ortbetonbauweise als Elementdecken mit Aufbeton ausgeführt, sofern ein System mit Unterzügen geplant wird.

- Bei der Stahlverbundbauweise können die Decken sowohl als Verbunddecke, bestehend aus Stahltrapezblechen mit Aufbeton, als auch als Ortbetondecke, bestehend aus Elementdecken mit Aufbeton ausgeführt werden.
- Bei Anordnung eines Kellergeschosses wird dieses unabhängig von der Bauweise in Ortbeton ausgeführt.

#### 4.3.15.2 Stützenstellung

Unter dem Parameter der Stützenstellung wird die Anzahl und Anordnung der Konstruktionsachsen verstanden. Es werden allgemein 11 verschiedene Stützenstellungen definiert. Diese sind im wesentlichen von der Bürostruktur und der Tiefgaragenanordnung abhängig. Bei der Tiefgaragenanordnung wird zusätzlich noch nach Garagensystem und Baukörperausrichtung unterschieden. Als mögliche Stützenstellungen werden definiert:

- einfeldige Tragkonstruktion ohne Tiefgarage
- einfeldige Tragkonstruktion mit Tiefgarage
- zweifeldige, symmetrische Tragkonstruktion ohne Tiefgarage
- zweifeldige, asymmetrische Tragkonstruktion ohne Tiefgarage
- zweifeldige Tragkonstruktion mit Tiefgarage, Fahrgasse parallel zum Baukörper, durchgängiges Garagensystem
- zweifeldige Tragkonstruktion mit Tiefgarage, Fahrgasse senkrecht zum Baukörper, durchgängiges Garagensystem
- dreifeldige Tragkonstruktion ohne Tiefgarage, Stützen beiderseits des Flures
- dreifeldige Tragkonstruktion ohne Tiefgarage, Dreibund mit ungleichen Spannweiten  $l_1 > l_2$
- dreifeldige Tragkonstruktion ohne Tiefgarage, Kombibüro
- dreifeldige Tragkonstruktion mit Tiefgarage unterhalb des Baukörpers, Fahrgasse parallel zum Baukörper
- dreifeldige Tragkonstruktion mit Tiefgarage, durchgehendes Garagensystem, Großraumbüro

Die verschiedenen Stützenstellungen sind in Tabelle 4-3 zusammengestellt.

#### 4.3.15.3 Deckenkonstruktion

Die Anordnung von Unterzügen und deren Ausrichtung sowie die zugehörige Spannrichtung der Decke werden mit dem Parameter der Deckenkonstruktion beschrieben. Die verschiedenen Alternativen sind von der Bauweise und der Stützenstellung abhängig. Es werden 7 verschiedene Alternativen für das Modell definiert, die in Tabelle 4-4 dargestellt sind.

Zusätzlich zu den oben beschriebenen Deckenkonstruktionen sind noch weitere Möglichkeiten denkbar, die hier jedoch nicht weiter aufgelistet werden. Da sich die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit vorwiegend mit Skelettbauten und vorgehängten Fassaden beschäftigen, werden die Konstruktionen mit tragenden Außenwänden nicht weiter betrachtet. Der Standardgeschossmodul hat eine Breite von ungefähr 15 m und eine Länge von 25 m. Die Achsabstände der Konstruktionsachsen bewegen sich ungefähr zwischen 2,0 m und 7,5 m. Das bedeutet, dass in diesem Bereich problemlos Decken einachsrig gespannt werden können und somit eine Unterteilung der Unterzüge in Haupt- und Nebenunterzüge nicht sinnvoll erscheint. Aus diesem Grund werden die Deckenkonstruktionen mit Haupt- und Nebenunterzügen nicht näher untersucht. Eine spätere Einbindung dieser Varianten in die entsprechenden Programmmodule ist unproblematisch.

Auf der Basis dieser Überlegungen werden Deckenkonstruktionen mit Unterzügen in Gebäude-längsrichtung, in Gebäudequerrichtung und Flachdecken in dieser Arbeit genauer betrachtet.

Nr	Stützeinstellung		System durchgängig Baukörper parallel Fahrgasse			System durchgängig Baukörper senkrecht Fahrgasse	Tiefgarage unterhalb Baukörper	Einbund	Zweibund	Dreibund	Großraum	Kombi	Revi
	Schnitt	Grundriss	Tiefgarage										
1								X	X	X	X	X	X
			X	X	X			X	X	X	X	X	X
2												X	X
3									X			X	X
			X						X			X	X
4				X					X			X	X
5									X				
6										X			
												X	
					X							X	
7			X	X							X		

Tabelle 4-3: Matrix der möglichen Stützenstellungen

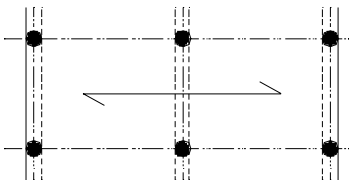
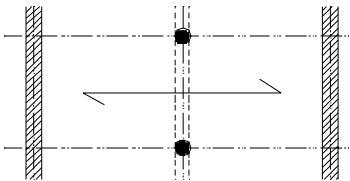
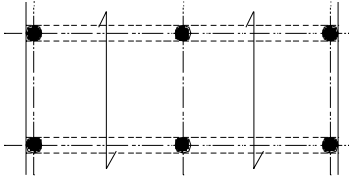
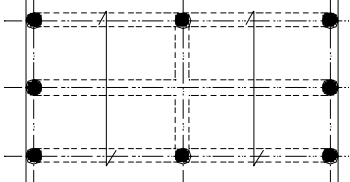
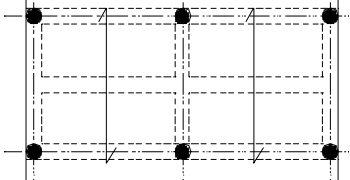
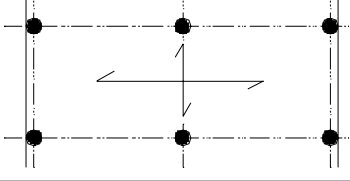
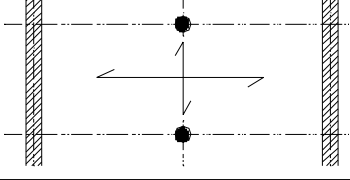
Nr	Deckenkonstruktion	Beschreibung
1		Unterzüge in Gebäudelängsrichtung
2		Mittige Unterzüge in Gebäudelängsrichtung mit tragenden Außenwänden
3		Unterzüge in Gebäudequerrichtung
4		Unterzüge in Gebäudequerrichtung+ mittige Hauptträger in Gebäudelängsrichtung
5		Unterzüge in Gebäudequerrichtung+ Haupt und Randträger in Gebäudelängsrichtung
6		Flachdeckensystem
7		Flachdeckensystem mit tragenden Außenwänden

Tabelle 4-4: Varianten möglicher Deckenkonstruktionen

#### 4.3.15.4 Abhängigkeiten von Bauweise, Stützenstellung und Deckenkonstruktion

In der folgenden Tabelle wird die Abhängigkeit der Deckenkonstruktion von der Stützenstellung und der Bauweise dargestellt.

		Stützenstellung											Bauweise			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1	2	3	4
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1	2	3	4
Deckenkonstruktion	1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X
	2	X		X	X			X	X	X			X			
	3	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X
	4			X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	(X)	X
	5	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	(X)	X
	6			X	X	X	X					X		X		
	7			X	X								X			

Tabelle 4-5: Abhängigkeit der Deckenkonstruktion von Stützenstellung und Bauweise

Die unterlegten Felder in der obigen Tabelle zeigen die in dieser Arbeit betrachteten Möglichkeiten einer Tragwerkslösung.

#### 4.3.15.5 Lastannahmen

Zur Berechnung des Tragwerks sind entsprechende Lastannahmen zu treffen. Die wesentlichen Lasten sind das Eigengewicht, die Ausbaulasten, die Verkehrslasten und die Schneelasten. Die Windlasten werden durch angrenzende Kerne und vertikale Wandscheiben sowie durch die Scheibentragwirkung der Geschossdecken in die Fundamente abgeleitet. Daher werden diese Lasten in der Entwurfsberechnung nicht weiter berücksichtigt.

Das Modell wird so aufgebaut, dass die Eigengewichtslasten automatisch ermittelt werden. Für die Deckenberechnung wird eine Ausbaulast von  $2,0 \text{ kN/m}^2$  angenommen. Die Verkehrslast für Bürogeschosse beträgt  $p = 2,0 \text{ kN/m}^2$ . Dazu ist die zusätzliche Last  $\Delta p$  aus den leichten Trennwänden zu addieren. Die gesamte Verkehrslast wird automatisch berechnet, jedoch kann diese individuell im Programm eingegeben werden. Weiterhin ist die Regelschneelast  $s_0$  anzugeben. Eigengewicht und Verkehrslast sind für verschiedene Dachkonstruktionen in einer Datenbank gespeichert und werden durch eine Auswahl entsprechend in der Berechnung berücksichtigt. Das Eigengewicht der Fassade wird ebenfalls aus einer Datenbank automatisch in das Programm eingelesen.

#### 4.3.15.6 Anpassung an Raumgeometrie

Durch ein spezielles Steuermodul können bei der Berechnung der Konstruktionsachsen in Gebäudelängsrichtung diese an das Raster der Standardräume angepasst werden. Dadurch wird erreicht, dass die Stützen immer in den Trennwandachsen angeordnet sind und nicht frei im Raum stehen.

#### 4.3.15.7 Geschossmodul

Mit Hilfe der bisher definierten Parameter kann das Geschossmodul (Büro- bzw. Normalgeschoss) eindeutig bestimmt werden. Dieses wird allgemein als rechteckiger Grundriss angenommen, an dessen Enden ein Kern bzw. eine aussteifenden Wandscheibe anschließt (siehe Abbildung 4-15). Der Kern enthält die vertikale Erschließung, einschließlich des notwendigen Treppenhauses, sowie Sanitär- und Technikräume.

Für einen vernünftigen Anschluss der Fassade an den Kern bzw. an die Wandscheibe wird die letzte Ausbaurasterachse im Abstand einer halben Trennwanddicke vor dem Kern bzw. der Wandscheibe angeordnet. Vereinfachend werden die Wanddicken mit 20 cm angenommen.

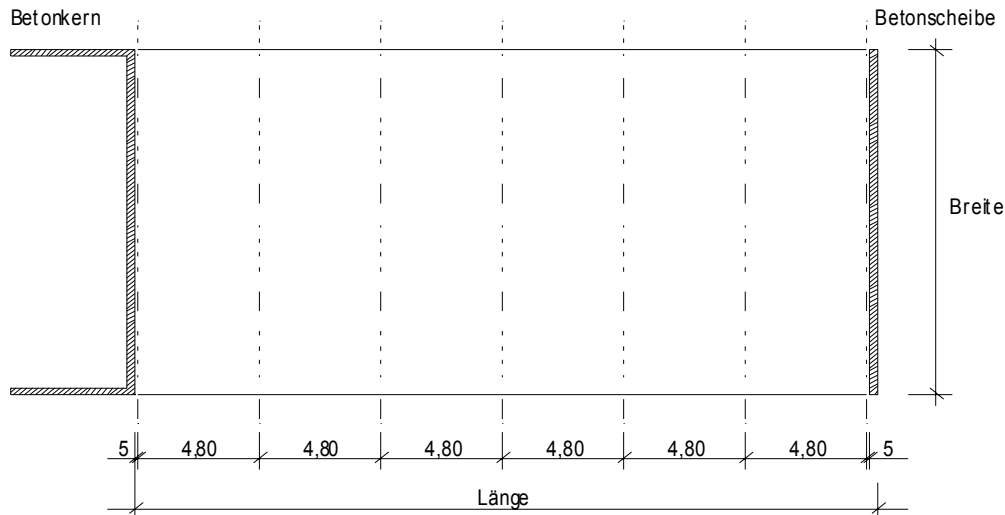


Abbildung 4-15: Allgemeines Geschossmodul

Als Modullänge wird der Abstand zwischen der Kernwand- und Außenkante Betonscheibe definiert. Sie berechnet sich aus dem  $n$ -fachen des Rastergrundmaßes zuzüglich der halben Trennwanddicke am jeweiligen Ende und Dicke der Betonscheibe.

$$l_{GM} = n_I \cdot r + twd + 0,20 \text{ m} \quad (Gl. 4-5)$$

$l_{GM}$  ..... Länge Geschossmodul  
 $n_I$  ..... Anzahl der Raster über die Länge  
 $r$  ..... Rastergrundmaß  
 $twd$  ..... Dicke Trennwandsystem

Die Modullänge hängt direkt von der Fluchtweglänge ab. Bei dem gewählten Geschossmodul ist nur eine einseitige Fluchtmöglichkeit gegeben. Deshalb darf der Fluchtweg nach Vorschrift nicht länger als 35 m sein. Somit ist die Länge des Geschossmoduls direkt von der Fluchtweglänge abhängig. Sicherlich lassen sich andere Brandschutzmaßnahmen anwenden, die die Gebäudelänge nicht beschränken, jedoch wird hier ein Ansatz gewählt, der eine ausreichende Fluchtweglänge ermöglicht, ohne dass zusätzliche Maßnahmen, z.B. in Form von Fluchtbalkonen, Brandabschnitten, zusätzlichen Fluchttreppen, notwendig werden. Vereinfachend wird der Fluchtweg als Summe der Länge von der Fassade bis zur Flurmitte und der Länge von der Wandscheibe bis in den Kern berechnet.

$$35,0 \text{ m} = lf_1 + lf_2 \quad (Gl. 4-6)$$

$lf_1$  ..... Fluchtweg vom Zimmer zum Flur  
 $lf_2$  ..... Fluchtweg Flur Treppenhaus

$$lf_2 = 35,0 \text{ m} - lf_1 \quad (Gl. 4-7)$$

Die Länge des Fluchtweges in Gebäudelängsrichtung bildet einen oberen Grenzwert für die Länge des Geschossmoduls. Somit gilt:

$$l_{GM} \leq 35,0 \text{ m} - lf_1 \quad (Gl. 4-8)$$

Bei einer zweiseitigen Anordnung von Fluchttreppen darf die Länge des Geschossmoduls verdoppelt werden.



### 4.3.16 Längsgeometrie

Die Berechnung der Modullänge ist von der Rasterart abhängig. Daraus ergeben sich verschiedene Modullängen. Abbildung 4-16 und Abbildung 4-17 zeigen mögliche Geschossmodule bei deckungsgleichem und getrenntem Ausbau- und Konstruktionsraster.

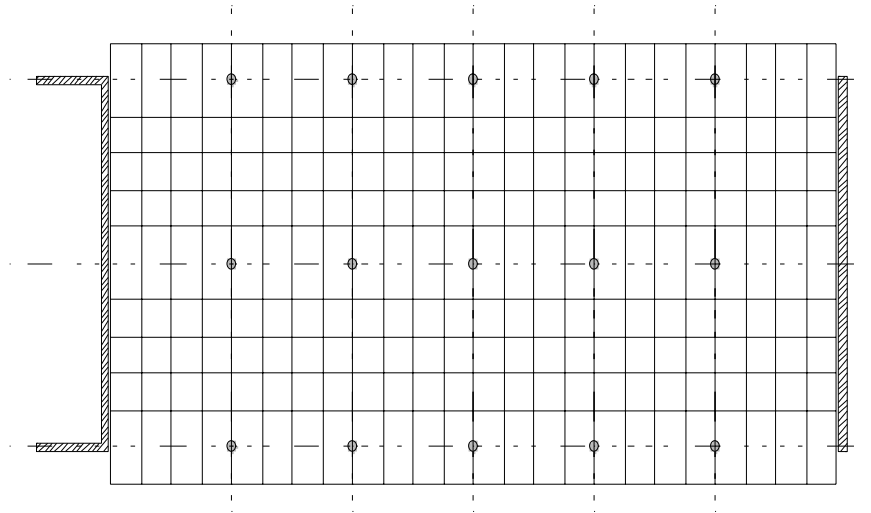


Abbildung 4-16: Deckungsgleiches Ausbau- und Konstruktionsraster

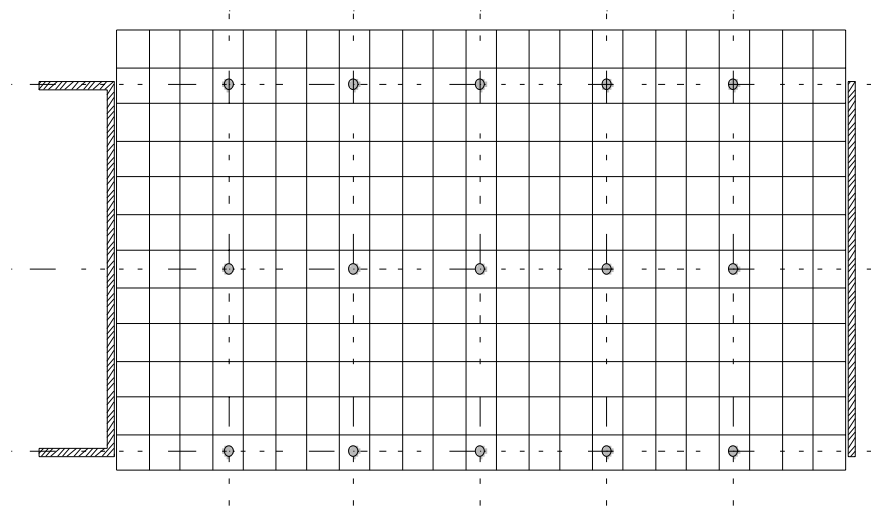
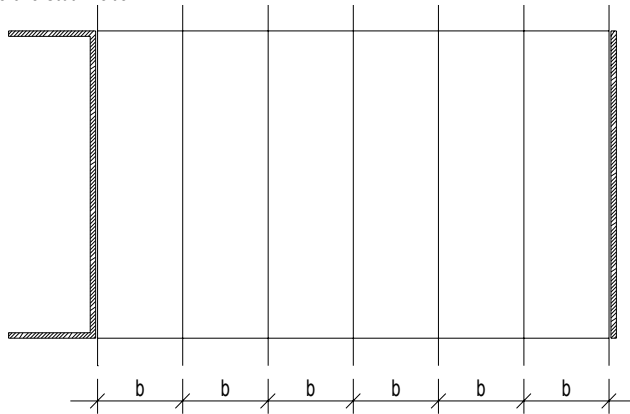


Abbildung 4-17: Getrenntes Ausbau- und Konstruktionsraster

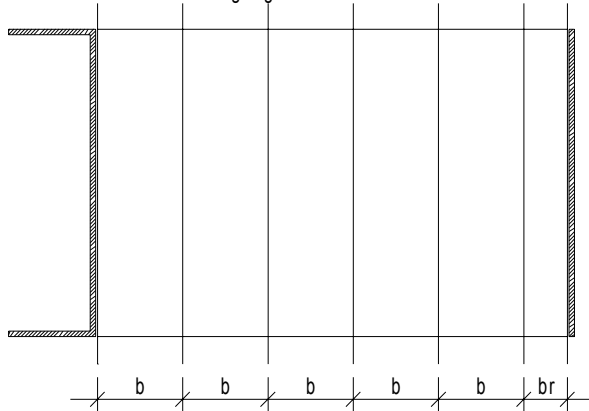
Bei deckungsgleichen Ausbau- und Konstruktionsraster sind drei verschiedene Geometrien denkbar. Die unten dargestellten Spannweiten beziehen sich auf die Rasterachsen. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die erste Rasterachse im halben Abstand der Trennwanddicke neben der Betonscheibe angeordnet ist.

1. gleiche Stützweiten



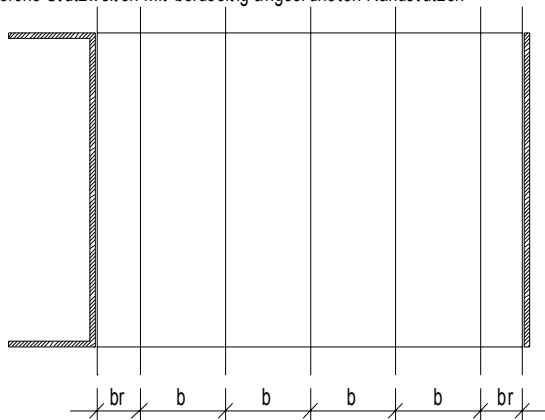
**Abbildung 4-18: Gleiche Stützweiten**

2. gleiche Stützweiten mit einseitig angeordneten Randstützen



**Abbildung 4-19: Gleiche Stützweiten + einseitige Randstützweite**

3. gleiche Stützweiten mit beidseitig angeordneten Randstützen



**Abbildung 4-20: Gleiche Stützweiten + beidseitige Randstützweiten.**

#### 4.3.17 Öffnungen in Geschossdecken

Öffnungen in den Decken der Normalgeschosse können zum einen für die Belichtung und zum anderen für die interne Erschließung einzelner Ebenen untereinander notwendig werden. Die Art solch einer Öffnung wird ebenfalls über einen Entwurfsparameter gesteuert.

Es sind folgende drei Varianten von Öffnungen in der Normalgeschossdecke möglich:

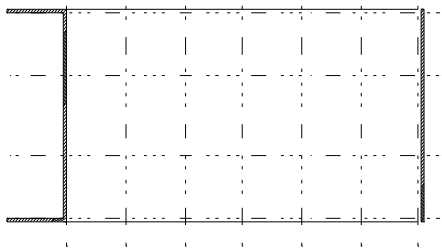
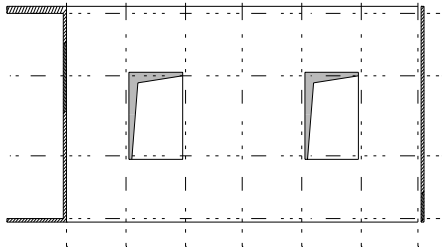
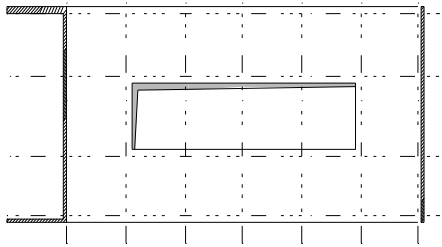
Nr	Öffnungstyp	Beschreibung
1		geschlossene Decke
2		mehrere Öffnungen
3		große mittige Öffnung

Abbildung 4-21: Varianten von Deckenöffnungen im Normalgeschoss

Bei Kombibüros wird der Flächenverlust der Gemeinschaftszone infolge von Öffnungen berücksichtigt und der entsprechende Flächenbedarf im Bereich neben den Öffnungen zur Verfügung gestellt.

Bei großen mittigen Öffnungen werden bei mehr als 5 Feldern in Gebäudelängsrichtung jeweils die ersten und die letzten zwei Felder ohne Öffnung ausgeführt. Bei weniger als 5 Felder werden nur das erste und das letzte Feld von der Öffnung ausgenommen.

#### 4.3.18 Dachgeschoss

Das Dachgeschoss wird beim Entwurf besonders betrachtet, da die Dachkonstruktion den oberen Raumabschluss des Gebäudes bildet.

Vereinfachend wird bei der konstruktiven Durchbildung des Daches davon ausgegangen, dass dieses wie die Decken der Normalgeschosse ausgeführt wird. Bei der Wahl der baukonstruktiven Durchbildung stehen jedoch mehrere Alternativen zur Verfügung.

Folgende Annahmen werden im Zusammenhang mit Dachöffnungen getroffen:

- Die Auswahl der Öffnung hat einen Einfluss auf die Stützenstellung. So wird bei einer großen mittleren Öffnung und bei einem Dachaufbau eine dreifeldige Tragkonstruktion notwendig.

- In den Randfeldern werden keine Öffnungen zugelassen.
- Die Öffnungen und die damit verminderten Lasten werden bei der statischen Berechnung vernachlässigt. Bei der Ermittlung der Rohbaukosten wird der geringere Materialverbrauch der Öffnungen berücksichtigt

Der Dachaufbau kann individuell durch folgende Parameter vorgegeben werden.

- Eigengewicht des Dachaufbaus [kN/m<sup>2</sup>]
- Verkehrslast bei begehbarem Dach [kN/m<sup>2</sup>]
- Herstellungskosten [DM/m<sup>2</sup>]
- bauphysikalische Werte

Diese Daten sind in einer programmeigenen Datenbank gespeichert.

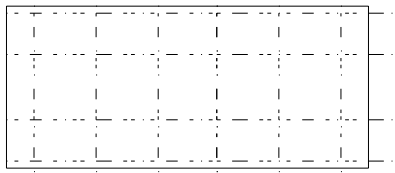
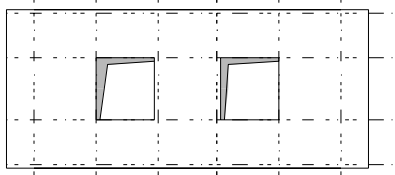
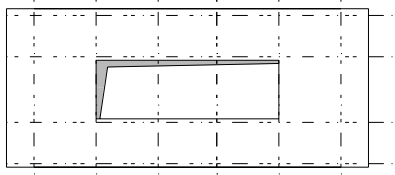
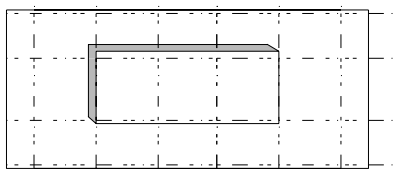
Nr	Öffnungstyp	Beschreibung
1		geschlossenes Dach
2		Dach mit mehreren Belichtungsöffnungen
3		Dach mit großer mittlerer Belichtungsöffnung
4		begehbare s Dach mit mittigem Stahlaufbau (z.B. für Konferenzraum)

Abbildung 4-22: Varianten von Dachöffnungen

#### 4.3.19 Erdgeschoss

Gemäß den Vorgaben des Bauherrn kann es notwendig sein, Sonderräume wie Empfang, Cafeteria etc. vorzusehen. Diese Räume werden vorwiegend im Erdgeschoss angeordnet.

Die Option, das Erdgeschoss nicht wie die normalen Bürogeschosse auszuführen, wird über einen eigenen Parameter gesteuert. Zusätzlich dazu wird bei der Wahl als Sondergeschoss die Geschosshöhe unabhängig von der Geschosshöhe der Bürogeschosse vorgegeben. Es wird jedoch angenommen, dass die Fassadenkonstruktion über alle Geschosse durchgängig verläuft.

#### 4.3.20 Kellergeschoss

Die Anordnung eines Kellergeschosses ist wie das Erdgeschoss von der Vorgabe des Bauherrn abhängig. Entwurfsparameter sind der Steuerparameter für die Anordnung eines Kellergeschosses und die Höhe des Kellergeschosses.

#### 4.3.21 Flurbreite

Für die Berechnung des Gebäudequerschnitts ist die Flurbreite ein weiterer wichtiger Entwurfsparameter. Die Flurbreite hängt von zwei wesentlichen Faktoren ab. Zum einen ist bei Bürogebäuden mit Gängen die Flurbreite so zu bemessen, dass zwei Personen mit einem Aktenordner unter dem Arm einander passieren können. Auch wird eine minimale Flurbreite aus Brandschutzgründen vorgegeben. Im Rahmen dieser Arbeit wird die minimale Flurbreite für ein Bürogebäude auf 2,10 m festgesetzt. Bei Kombibüros darf die Flurbreite ein Minimum von 1,10 m nicht unterschreiten. Bei der Anordnung von Stützen im Flurbereich ist die Flurbreite als lichte Weite zwischen Stütze und Trennwand definiert. Unter Einhaltung der Mindestmaße kann die Flurbreite frei gewählt werden.

#### 4.3.22 Brandschutzvorschriften

Ein ausreichender Brandschutz ist bei allen Planungen im Hochbau oberstes Gebot. Gerade bei der Verbundbauweise nimmt der Brandschutz einen wesentlichen Einfluss auf die Konstruktion. Bei Büro- und Verwaltungsbauten gelten folgende Brandschutzanforderungen:

- Bei Gebäuden ab 7 Geschossen gelten besondere Vorschriften für Hochhäuser.
- Es sind in der Regel zwei getrennte Rettungswege notwendig, wobei der erste Rettungsweg über eine notwendige Treppe führen muss.
- Bei Anordnung eines Sicherheitstreppenhauses ist nur ein Fluchtweg erforderlich.
- Der zweite Rettungsweg kann über Fluchtbalkone oder über Rettungsgerät der Feuerwehr, z. B. eine Drehleiter, erfolgen. Hierbei sind die Rettungsmaßnahmen auf ungefähr 23 m Höhe (Brüstung des obersten Aufenthaltsraumes) begrenzt.
- Die Fluchtweglänge bis zum Fluchttreppenhaus darf 35 m nicht überschreiten.
- Die horizontale Brandabschnittsgröße darf 1600 m<sup>2</sup> nicht überschreiten, ansonsten sind aktive Brandschutzanlagen erforderlich.
- Geschossdecken bilden unter Einhaltung der DIN 4102 einen horizontalen Brandabschnitt. Es dürfen ohne besondere Vorkehrungen keine Öffnungen oder Durchbrüche in der Decke vorgesehen werden. Geschossübergreifende Brandabschnitte bedürfen einer besonderen Genehmigung. In diesem Fall werden zwei unabhängig voneinander erreichbare Treppenhäuser notwendig, und es kann z. B. eine Feuerlöschanlage (Sprinkleranlage) gefordert werden.
- Bei Kombibüros sind eine übersichtliche Gestaltung der Grundrisse in der Gruppenzone, verglaste Trennwände zwischen Gruppenzone und Einzelbüros, der Einbau einer Brandmeldeanlage (akustisch), die maximale Entfernung von 35 m zu den Fluchttreppen und die Anordnung von möglichst zwei gegenüberliegenden Ausgängen zu planen.
- Bei Anordnung einer Sprinkleranlage ist das gesamte Gebäude bzw. der betrachtete Abschnitt damit auszurüsten.

Diese Auflistung dient nur als Anhaltspunkt für den Brandschutz eines Bürogebäudes. Aus diesen Anforderungen werden nachfolgende Annahmen für die weiteren Untersuchungen in dieser Arbeit getroffen:

- Es werden nur Gebäude mit maximal 7 Vollgeschossen untersucht.
- Es werden keine Hochhäuser untersucht, daher darf die Gebäudehöhe 25,0 m nicht überschreiten.

- Der erste Fluchtweg erfolgt über notwendige Treppen, der zweite Fluchtweg erfolgt über Fenster und Rettungsgerät der Feuerwehr, wie z.B. eine Drehleiter.
- Die maximale Fluchtweglänge vom Büro zum Fluchttreppenhaus darf 35 m nicht überschreiten.

Bei der Berechnung des Büromoduls sind zwei verschiedene Vorgaben möglich.

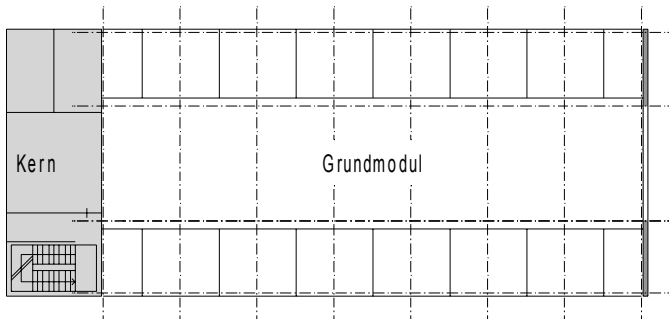


Abbildung 4-23: Einseitige Anordnung der Fluchttreppe

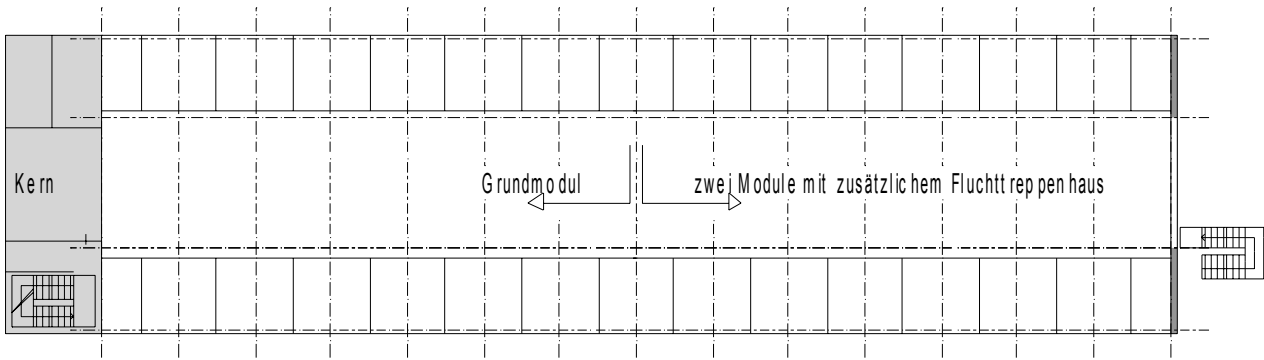


Abbildung 4-24: Zweiseitige Anordnung der Fluchttreppen

#### 4.4 Variableneinteilung

Die in Kapitel 4.3 beschriebenen Variablen beschreiben eindeutig ein Grundmodul. Es stellt sich jedoch bei näherer Untersuchung heraus, dass nicht alle Variablen bei der Entwicklung eines Grundmoduls frei veränderbar sind. Manche Variablen sind durch die Randbedingungen und Vorgaben der Entwurfsaufgabe vorbestimmt und daher nicht mehr frei verfügbar. Aus diesem Grund werden feste und freie Variablen unterschieden. Unter festen Variablen werden solche Variablen verstanden, die nicht durch eine Optimierung oder eine Simulation verändert werden, sondern als fest vorgegebene Größen in die Entwurfsbearbeitung einfließen. Diese Variablen hängen in der Regel von einer vorgegebenen Aufgabenstellung ab und werden dadurch festgelegt.

**Feste Variablen:**

- 1 Bürotyp
- 2 Bürostruktur:  
Bürotyp und Bürostruktur hängen direkt zusammen und werden in der Regel bereits zu Beginn eines Planungsprozesses festgelegt. Die Auswahl wird durch die Firmenstruktur und das Management bestimmt.
- 3 Fläche Standardbüro:  
Wie bereits erläutert, ist das Standardbüro der kleinste Baustein, aus dem ein Bürogebäude entwickelt wird. Die Größe der Fläche wird durch den gewünschten Standard des Bauherrn und durch die Arbeitsstruktur des Unternehmens vorgegeben.
- 4 Vorgabe der Standardraumgeometrie:  
Die Berechnung erfolgt über die Raumbreite oder die –tiefe. Die Standardraumgeometrie kann sowohl als feste Variable durch Vorgabe von Breite oder Tiefe oder als freie Variable bestimmt werden. Bei einer festen Vorgabe bestimmen die Möblierung und die Arbeitsabläufe die Geometrie eines Raumes. Hierbei sind jedoch die minimale Breite von 2,30 m und die minimale Tiefe von 3,40 m einzuhalten. Die minimale Geometrie ist in der Arbeitsstättenverordnung genau vorgegeben.
- 5 Fläche pro Arbeitsplatz:  
Die Fläche pro Arbeitsplatz ist nur bei einer Kombistruktur wichtig. Sie wird benötigt, um zusammen mit anderen Variablen die Breite der Gemeinschaftszone in einer Kombistruktur zu berechnen.
- 6 Anzahl Arbeitsplätze je Büro
- 7 Anzahl Standardräume pro Geschoss
- 8 Anzahl Standardräume pro Grundmodul
- 9 Maximale Raumgröße
- 10 Lichte Raumhöhe
- 11 Anordnung einer Tiefgarage:
  - 11.1 Tiefgaragensystem
  - 11.2 Garagensystem
  - 11.3 Baukörperausrichtung
- 12 Dachausbildung
- 13 Ausbildung Decke Normalgeschoss
- 14 Ausbildung Erdgeschoss
- 15 Anordnung Keller
- 16 Lastannahmen:
  - 16.1 Regelschneelast
  - 16.2 Verkehrslast Dach
  - 16.3 Ausbaulast Dach
  - 16.4 Verkehrslast Normalgeschoss
  - 16.5 Ausbaulast Normalgeschoss
  - 16.6 Verkehrslast Erdgeschoss
  - 16.7 Ausbaulast Erdgeschoss
  - 16.8 Eigengewicht Längsfassade
- 17 Baukonstruktive Angaben:
  - 17.1 Dachaufbau
  - 17.2 Fassadensystem
  - 17.3 Aufbau Giebelwand
  - 17.4 Trennwandsystem
  - 17.5 Aufbau Boden gegen Erdreich

- 18 Angaben zur Berechnung der Energiebilanz:
  - 18.1 Tageslichtemmissionsgrad
  - 18.2 Nennbeleuchtungsstärke
  - 18.3 geografische Lage
  - 18.4 Heizgrenztemperatur
  - 18.5 Gradtagzahl
  - 18.6 Ausrichtung Grundmodul
- 19 Materialeigenschaften:
  - 19.1 Beton
  - 19.2 Bewehrungsstahl
  - 19.3 Baustahl
- 20 Brandschutzvorgaben:
  - 20.1 Feuerwiderstandsklasse der tragenden Bauteile
  - 20.2 Anordnung der Fluchtwege
- 21 Angaben zur Finanzierung (Vorgabe: Nutzungszeitraum 25 Jahre):
  - 21.1 Zinssatz Verzinsung Eigenkapital
  - 21.2 Zinssatz Verzinsung Fremdkapital
  - 21.3 Verhältnis von Eigen- zu Fremdkapital

Demgegenüber stehen die freien Variablen. Diese Variablen können sowohl manuell als auch im Rahmen einer Entwurfsoptimierung automatisch verändert werden.

#### **Freie Variablen:**

- 1 Trennwandsysteme:  
Es kann aus den wesentlichen Trennwandsystemen ausgewählt werden. Zusätzlich dazu besteht die Möglichkeit, vorgegebene Systeme zu verwenden. In diesem Fall wird aus der freien Variable eine feste Variable.
- 2 Unterdecke
- 3 Elektroinstallation
- 4 Heizungs- und Lüftungsinstallation
- 5 Fußbodenaufbau
- 6 Rastergrundmaß
- 7 Faktor für Stützraster:  
Die Achsabstände der Konstruktionsraster in Gebäudelängsrichtung werden als Vielfaches des Rastergrundmasses definiert und mit Hilfe des Faktors berechnet.
- 8 Rasterart
- 9 Stellung der Außenstütze
- 10 Abstand der Außenstütze zur Fassade
- 11 Stellung der Innenstütze
- 12 Abstand der Innenstütze zur Trennwand
- 13 Flurbreite
- 14 Längsgeometrie
- 15 Anpassung Trennwand an Konstruktion
- 16 Tragsystem
- 17 Bauweise
- 18 Deckenkonstruktion
- 19 Ausführung der Stahlbetonstützen:  
Es besteht die Wahl zwischen einer Rechteck-, bzw. Quadrat- und einer Rundstütze



- 20 Ausführung Decke bei Stahlverbundkonstruktionen:  
Bei der Verbundbauweise kann ausgewählt werden, ob die Decke als Betondecke oder als Verbunddecke ausgeführt wird.
- 21 Montage Verbundträger:  
Die Verbundträger können wahlweise mit oder ohne Hilfsstütze montiert werden. Die Montage mit Hilfsstütze beeinflusst den notwendigen Stahlquerschnitt im Bauzustand.
- 22 Auswahl Verbundträgerquerschnitt:  
Die Auswahl des Trägerprofils aus IPE, HEA, HEB und HEM Profilen kann auf zwei Arten nach der kleinsten Trägerhöhe und nach der kleinsten Querschnittsfläche vorgenommen werden. Die Auswahl einer geringen Trägerhöhe hat eine geringe Konstruktionshöhe der Deckenkonstruktion zur Folge. Die Wahl einer geringen Querschnittsfläche führt zu einem geringen Stahlverbrauch des Verbundträgers.
- 23 Ausbildung Tiefgarage:
  - 23.1 Anzahl Stellplätze nebeneinander  $\Rightarrow$  Breite Fahrgasse
  - 23.2 Stellung der Stütze in Bezug auf Fahrgasse

#### 4.5 Berechnung Grundmodul

Die Berechnung des Grundmoduls besteht aus drei Schritten:

1. Berechnung der Modulgeometrie
2. Statische Berechnung der Tragstruktur
3. Massenberechnung

Mit Hilfe aller eingegebenen Parameter lässt sich die Modulgeometrie eindeutig beschreiben und die notwendigen Parameter für den Fortgang der Berechnung können ermittelt werden. Daraus wird die Einteilung und Positionierung der Tragelemente für die statische Berechnung vorgenommen und aus diesen Ergebnissen wiederum die entsprechenden Massen abgeleitet. Die berechneten Massen dienen als Grundlage für die Berechnung der Kriterien.

Die wichtigsten Parameter zur Beschreibung der Geometrie und für die weiteren Berechnungen sind:

Länge Grundmodul .....	$l_{GM}$	[m]
Breite Grundmodul .....	$b_{GM}$	[m]
Höhe Grundmodul.....	$h_{GM}$	[m]
Geschoßhöhe .....	$h_G$	[m]
Achsabstände Gebäudelängsrichtung.....	$b, b_r$	[m]
Achsabstände Gebäudequerrichtung .....	$l_1, l_2$	[m]
Anzahl Stützweiten in x-, y-Richtung .....	$n_x, n_y$	

Für alle möglichen Varianten nach Tabelle 4-4 wird ein spezielles Programmodul entwickelt. Die Berechnung wird am Beispiel eines Kombibüros ohne Tiefgarage in Anhang A-3 näher erläutert. Alle anderen Geometrien werden entsprechend entwickelt und in ein Programmodul integriert. Für die statische Berechnung wurden in Abhängigkeit aller möglichen Geometrien die entsprechenden Positionen und der Berechnungsablauf definiert. Dieser Teil und die Berechnung der Massen wurde ebenfalls in das Programmodul integriert. Somit kann die Berechnung des Grundmoduls umfassend durchgeführt werden.

## 5 Beurteilung von Bürogebäuden

### 5.1 Allgemeines

Die allgemeine Beurteilung eines Gebäudeentwurfs enthält sowohl subjektive (Städtebauliche Anordnung auf dem Grundstück, Gebäudeform, Baukörperföugung, etc.) als auch objektive Kriterien (Fläche, Volumen, Kosten). Da die subjektiven Kriterien immer von der oder den entscheidenden Personen abhängig und nicht eindeutig messbar sind, können solche Kriterien nicht automatisiert, d. h. in ein Optimierungsmodell eingearbeitet werden. Somit beschränkt sich die Untersuchung in dieser Arbeit auf messbare, objektive Kriterien.

Das in Kapitel 3 vorgestellte Verfahren verwendet ein einfaches Modell, bei dem normierte Messzahlen der einzelnen Bewertungskriterien, die mit einem Gewichtungsfaktor multipliziert werden, zu einer gesamten Bewertungszahl, dem Fitnesswert, addiert werden. Eine wichtige Eigenschaft dieses Modells ist die Flexibilität der Anzahl der Bewertungskriterien. Dies ist deshalb wichtig, weil verschiedene Kriterien sowohl allein als auch in Kombinationen verwendet und weil neue, zukünftige Kriterien hinzugefügt werden können.

In diesem Kapitel werden nun wesentliche Kriterien definiert und für Bürogebäude ausgearbeitet, wobei das momentan wichtigste Kriterium der Baukosten kritisch analysiert und erweitert wird. Darüber hinaus werden zusätzliche Kriterien z. B. aus Umwelt, Politik, Wirtschaft, Technik, Funktion etc. für eine ganzheitliche Untersuchung definiert und Ansätze für neue Beurteilungskriterien diskutiert.

Die Betrachtung eines Gebäudes sollte sich nicht nur allein auf die Herstellung konzentrieren, sondern auch auf den Betrieb eines Gebäudes. Unter dem Betrieb eines Gebäudes werden in der Regel die Kosten verstanden, die bei der Benutzung anfallen. Vereinfacht gesagt ist ein billiges Gebäude mit hohen Baunutzungskosten ab einem gewissen Zeitpunkt schlechter als ein teureres Gebäude mit niedrigeren Baunutzungskosten. Dieser Zusammenhang ist qualitativ in nachstehender Abbildung dargestellt.

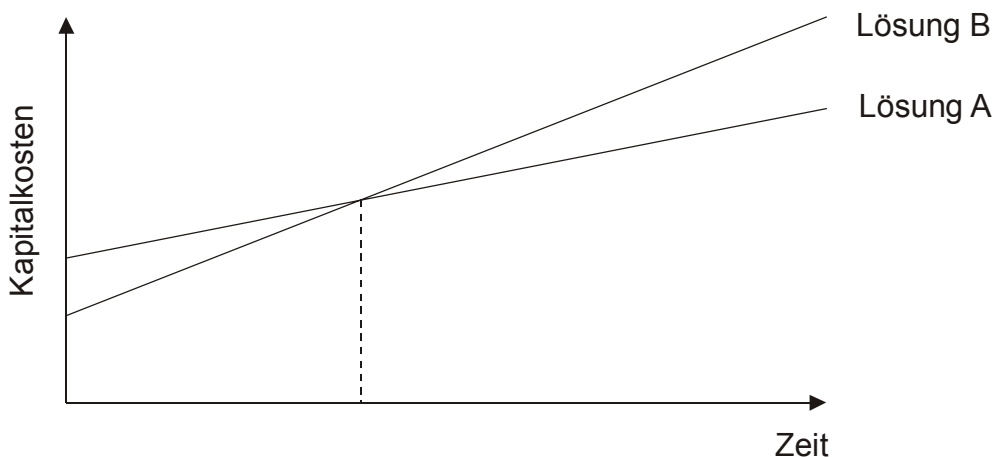


Abbildung 5-1: Kalkulatorischer Variantenvergleich

Um eine ganzheitliche Beurteilung von Gebäudeentwürfen durchführen zu können, ist es notwendig, neben den Herstellkosten die Baunutzungskosten als ein weiteres Kriterium einzuführen.

Neben den Kosten interessieren auch geometrische Kriterien wie beispielsweise der Brutto-rauminhalt und die Bruttogeschossfläche. Aus der Kombination der beiden vorgenannten Kriterien lassen sich auf die Geometrie bezogene Kriterien wie Gesamtkosten/Bruttorauminhalt und Gesamtkosten/Bruttogeschossfläche definieren.

Steht zu Beginn eines Planungsprozesses der Bauherr und der Nutzer fest, so kann man davon ausgehen, dass für die Entwurfsaufgabe relativ genaue Zielvorstellungen existieren. Im Gegensatz dazu steht bei Spekulationsprojekten die Flexibilität des Entwurfs im Vordergrund. Die geplanten Geschossflächen sollen flexibel den Ansprüchen der Mieter angepasst werden können. Obwohl die meisten Gebäude mehr als 50 Jahre nutzbar sind, steht bei Bauherren meistens nur die kurz- und mittelfristige Planung im Vordergrund. Mögliche Nach- oder Umnutzungen werden selten mit eingeplant, da zu wenig Informationen existieren und eine größtmögliche Flexibilität des Gebäudes mit Mehrkosten verbunden ist, die von den Bauherren unter normalen Umständen nicht bezahlt werden. Um dennoch Aussagen über den ganzheitlichen Einfluss einer flexiblen Planung machen zu können, wird ein Flexibilitätskriterium eingeführt.

Die Frage nach der Umweltverträglichkeit erhält eine immer stärker werdende Gewichtung beim Entwurf. Diese Fragestellung definiert ein eigenes Forschungsgebiet, daher sollen im folgenden nur einige wenige Grundgedanken diskutiert werden, die als Anregung und Ausgangspunkt für weitergehende Untersuchungen und Entwicklungen dienen sollen. Eine zweifellos wichtige Frage im Zusammenhang mit der Umweltverträglichkeit ist die Frage der Energie. Bei immer knapper werdenden Energieressourcen und einem großen Energiebedarf bei Gebäuden wird so eine energetische Betrachtungsweise immer wichtiger.

Im Zusammenhang mit der Umweltverträglichkeit werden auch Fragestellungen nach einer temporären Nutzung und der damit verbundenen Rückbaubarkeit eines Gebäudes laut. Das bedeutet, dass man ein Kriterium definieren kann, mit dem sich die Recycelfähigkeit eines Gebäudes beschreiben lässt. Dieses Kriterium wird hier nicht weiter untersucht, es soll lediglich der Hinweis für weitere Untersuchungen im Zusammenhang mit einem ganzheitlichen Bewertungsmodell gegeben werden.

## 5.2 Baukosten

Unter den Baukosten werden momentan die Kosten zur Herstellung eines Gebäudes verstanden. Da der Herstellungsprozess nur einen sehr kleinen Zeitraum der Lebensdauer eines Gebäudes einnimmt, erscheint die Beschränkung der Baukosten auf die Herstellkosten nicht sinnvoll. Eine ganzheitliche Betrachtungsweise, die sich über die Lebensdauer eines Gebäudes erstreckt, erfordert ein entsprechendes Kostenmodell. Die Lebensdauer kann in drei Zeiträume eingeteilt werden, Herstellung, Nutzung und Abbau. In Anlehnung an diese Aufteilung wird ein Kostenmodell definiert, bei dem die Baukosten als übergeordneter Begriff verstanden werden. Die Baukosten setzen sich zusammen aus:

- Herstellkosten Kosten zur Herstellung eines Gebäudes
- Nutzungskosten Kosten, die beim Betrieb eines Gebäudes anfallen
- Abbaukosten Kosten, die am Ende eines Nutzungszeitraumes für den Abbau, Abriss, etc. anfallen.

Aussagen über die Lebenszeit eines Gebäudes, über die zukünftigen Abriss- und Entsorgungstechniken und die zugehörigen Kosten können nur sehr schwer gemacht werden. Daher werden diese Kosten hier nicht weiter verfolgt. Es ist jedoch zukünftig darüber nachzudenken, wie man bei der Entwurfsplanung solche Ansätze in die Planung mit einbeziehen kann.

Bei der Ermittlung der Kosten werden entwurfsunabhängige und entwurfsabhängige Kosten unterschieden. Entwurfsunabhängige Kosten sind:

- Kosten für das Baugrundstück
- Kosten für die Erschließung
- Kosten für Genehmigungen
- Kosten für zusätzliche Gutachten.

Da sich diese Kosten nicht auf das Ergebnis einer Entwurfsoptimierung auswirken, werden sie hier nicht weiter berücksichtigt.

Demgegenüber stehen die entwurfsabhängigen Kosten. Das sind Kosten, die direkt durch die Entwurfslösung, z. B. durch Größe, Konstruktionsprinzip, Bauweise etc., beeinflusst werden. Diese Kosten sind wesentlich bei einer Entwurfsoptimierung und werden in den nachfolgenden Kapiteln näher erläutert.

Zusätzlich zu den entwurfsunabhängigen bzw. abhängigen Kosten gibt es noch entwurfsunabhängige Kosteneinflüsse. Darunter werden Einflüsse auf die für die Kostenberechnung verwendeten Einheitspreise verstanden:

- Konjunkturelle Markteinflüsse
- Regionale Markteinflüsse
- Art des Angebots- und Vergabeverfahrens
- Größe des Bauvorhabens

Die konjunkturellen Markteinflüsse lassen sich an Hand der Baupreisindizes des statistischen Bundesamtes in Wiesbaden ablesen. Es besteht jedoch eine gewisse Schwierigkeit darin, aus den Indizes der vergangenen Jahre Prognosen für die Zukunft abzuleiten. Wichtig ist, dass alle entwurfsabhängigen Kosten im gleichen Maß beeinflusst werden und keine Auswirkung auf den Vergleich verschiedener Entwurfsvarianten entstehen. Diese Einflüsse können über entsprechende Korrekturfaktoren bei der Kostenberechnung berücksichtigt werden.

#### 5.2.1 Herstellkosten

Allgemein werden die Herstellkosten auf der Basis einer Kostenermittlung berechnet. Diese Kostenermittlung wird nach DIN 276 in mehreren Stufen, in Abhängigkeit der Planung durchgeführt. Zuerst wird eine Kostenschätzung durchgeführt. Die Gesamtkosten werden auf der Basis von Einheitspreisen - Kosten pro Fläche [DM/m<sup>2</sup>] oder Kosten pro Rauminhalt [DM/m<sup>3</sup>] - ermittelt. Diese Kostenschätzung ist relativ einfach durchzuführen, hat aber den Nachteil, dass beispielsweise die Einflüsse verschiedener Entwurfsalternativen auf die Herstellkosten bei gleichem Rauminhalt nur ungenau oder gar nicht berücksichtigt werden. In einem zweiten Schritt wird eine Kostenberechnung auf der Basis der einzelnen Gewerke durchgeführt. Diese Kostenberechnung bedarf einer möglichst genauen und detaillierten Planung, so dass die notwendigen Massen berechnet werden können. Dazu ist es auch notwendig, eine komplette statische Berechnung der einzelnen Entwurfsalternativen durchzuführen.

Wie bereits erläutert, sind für die Entwurfsoptimierung nur solche Kosten maßgebend, die direkt von den Entwurfparametern abhängen. Für einen Kostenvergleich im Rahmen der Entwurfsoptimierung werden daher nur die Kostengruppen 300 (Gebäude, Baukonstruktion) und 400 (Gebäude, Technische Anlagen) berücksichtigt. Nach [29] betragen diese ohne Grundstücks- und Finanzierungskosten ungefähr 65% der gesamten Herstellungskosten eines Bauwerks. Die Baunebenkosten belaufen sich auf ungefähr 25%. Die restlichen 10% verteilen sich auf Ausstattung und Kunstwerke sowie auf die Außenanlagen. Somit werden die Gebäudekosten (300+400) als die wesentlichen Kosten für eine Entwurfsoptimierung, näher untersucht.

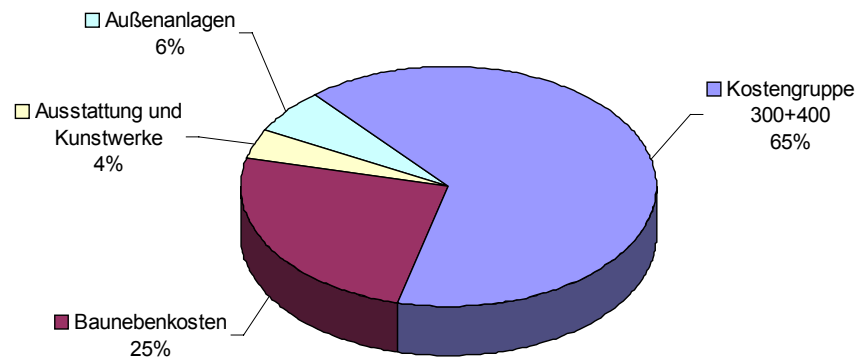


Abbildung 5-2: Kosten Bauwerk in % der Gesamtkosten ohne Grundstück und Erschließung nach [29]

Eine Gliederung der Kostengruppen 300 und 400 ist in Tabelle 5-1 dargestellt.

GROBELEMENTE			
300	Gebäude, Baukonstruktion		
	310 Baugrube	311	Baugrubenherstellung
	320 Gründung	322	Einzelfundamente (unter Stützen)
		322	Streifenfundament (unter Stirnwänden)
	330 Außenwände	331	Stirnwände
		332	Kellerwände
		333	Außenstützen
		335	Außenwandbekleidung Stirnwände außen
		336	Außenwandbekleidung Stirnwände innen
		337	Fassaden
		338	Sonnenschutz
	340 Innenwände	343	Innenstützen
		342	Nichttragende Innenwände
		344	Innentüren
		346	elementierte Innenwände
	350 Decken	351	Deckenkonstruktion
		352	Deckenbeläge (Fußboden)
		353	Deckenbekleidungen
	360 Dächer	361	Dachkonstruktion
		362	Dachöffnungen, Oberlichter, Glasdächer
		363	Dachbeläge
		364	Dachbekleidungen
400	Gebäude, Technische Anlagen	410	Abwasser-, Wasser- und Gasanlagen
		420	Wärmeversorgungsanlagen
		430	Lufttechnische Anlagen
		440	Starkstromanlagen
		450	Fernmelde- und informationstechnische Anlagen
		460	Förderanlagen
		470	Nutzungsspezifische Anlagen
		470	Gebäudeautomation
		480	Sonstige Maßnahmen für technische Anlagen

Tabelle 5-1: Kostengliederung nach DIN 276

Diese Kostengliederung entspricht nicht der Gliederung nach einzelnen Gewerken, wie sie im Bauablauf auftreten. So werden beispielsweise in der Kostengruppe 330 (Außenwände) sowohl Kosten für Stützen und Wände (Rohbau), als auch Kosten für Wandbekleidungen (Fassade und Innenausbau) zusammengefasst. Diese Vermischung der Kosten, ohne deren zeitliche Abfolge im Bauprozess und die verschiedenen ausführenden Firmen zu unterscheiden, erscheint als Grundlage für eine ganzheitliche Entwurfsbeurteilung nicht sinnvoll. Aus diesem Grund wird abweichend von der DIN 276 eine Aufteilung der Herstellkosten nach Rohbau- und Ausbaukosten vorgenommen. Diese Aufteilung erscheint aus der Sicht der Praxis sinnvoll, da in der Regel der Rohbau als komplette Leistung vergeben wird. Alternative aber teurere Rohbaulösungen, z. B. ein Sondervorschlag als Stahlverbundkonstruktion im Gegensatz zur ausgeschriebenen Betonkonstruktion, werden in der Regel nicht berücksichtigt, da eine ganzheitliche Beurteilung fehlt und damit die möglichen Einsparungen im Ausbau bei der Entscheidung der Rohbaulösung nicht berücksichtigt wird.

In [13] wird ein Verfahren zur Berechnung der Baukosten mit Hilfe von sogenannten Richt- bzw. Leitpositionen vorgeschlagen. Dieses Verfahren berechnet die Einheitspreise der einzelnen Leitpositionen unter Verwendung der Preise für Löhne, Stoffe und Geräte. Da der hierfür geforderte Aufwand für die Kostenberechnung im Rahmen einer Entwurfsoptimierung zu groß ist, wird das beschriebene Verfahren derart reduziert, dass die Einheitspreise der jeweiligen Leitpositionen aus den Stoffmengen und den aktuellen Preisen pro Menge berechnet werden.

Weiterhin wird in [13] der prinzipielle Ansatz einer ABC-Analyse vorgestellt. Diese Analyse besagt, dass rund 20% aller Positionen eines Leistungsverzeichnisses 80% der Kosten des Gebäudes ausmachen. Diese Positionen werden als A-Positionen bezeichnet.

Aus dieser Überlegung heraus wird eine Kostenberechnung verwendet, die sich nur auf die Kosten der sogenannten A-Positionen beschränkt. Diese Kosten beeinflussen zu 80% die Gebäudekosten und sind von der Geometrie und von den daraus resultierenden erforderlichen Massen abhängig. Somit entsteht durch die Berechnung und den Vergleich der wesentlichen entwurfsabhängigen Massen und Kosten ein einfaches und schnelles Kostenmodell für eine ganzheitliche Entwurfsbeurteilung und –optimierung.

Durch die Aufteilung in Roh- und Ausbaukosten können Aussagen über die gegenseitige Abhängigkeit gemacht werden. Interessant ist in diesem Zusammenhang die Frage, unter welchen Umständen eine Entwurfsvariante gefunden werden kann, die zwar im Rohbau teurer als eine vergleichbare Variante, jedoch bei den Herstellkosten insgesamt billiger ist.

Für das in Kapitel 5 definierten Grundmodul wird nachfolgende, nach Roh- und Ausbaukosten geordnete Kostengliederung verwendet.

ROHBAU	AUSBAU
Dachkonstruktion	Dachaufbau
Deckenkonstruktion	Fassade (Längsfassade + Giebelwände)
Stützen	Fußboden
Stirnwände	Deckenbekleidung
Kellerwände (sofern der Büromodul unterkellert ist)	nichttragende Innenwände (leichte Trennwände)
Sohle	Dämmung Sohlplatte
Gründung	Elektroinstallation
Erdarbeiten (Baugrube)	Heizungs- Lüftungsinstallation
	Kosten für aktive Brandschutzmaßnahmen

Tabelle 5-2: Kostengliederung

### 5.2.1.1 Rohbaukosten

In den folgenden Kapiteln werden die Berechnungsansätze für die oben genannte Kostengliederung zusammengestellt. Die verwendeten Einheitspreise sind für die jeweiligen Bauelemente im Anhang 4 zusammengestellt.

#### 5.2.1.1.1 Baugrube

Bei der Entwurfsoptimierung haben die Grundrissfläche und die Kellerhöhe einen Einfluss auf die Baugrube und somit einen Einfluss auf die Herstellkosten. Die Berechnung der Baugrube setzt sich aus den Teilleistungen zusammen:

- Oberboden abtragen und seitlich lagern
- Oberboden abtragen und abfahren
- Boden inklusive Fundamentaushub, Bodenklasse 3-5, ausheben und seitlich lagern
- Boden inklusive Fundamentaushub, Bodenklasse 3-5, ausheben und abfahren
- Arbeitsraum verfüllen und verdichten
- Einbringen und verdichten der obersten Mutterbodenschicht
- Deponiegebühren.

Ein Teil des Mutterbodens und des Aushubs wird für die spätere Verfüllung seitlich gelagert. Der restliche Boden wird auf eine Deponie gefahren. Hierfür fallen Deponiegebühren an.

Für die Analysen im Zusammenhang dieser Arbeit werden die Einflüsse aus Baugrubenumschließung, Wasserhaltung und besonderer Gründung nicht weiter berücksichtigt.

Es werden folgende Berechnungsannahmen getroffen:

- Der Abtrag des Mutter- bzw. Oberbodens erfolgt in einer Dicke von 30 cm auf der Fläche der Baugrube.
- Bei der Berechnung der Baugrubengeometrie wird von einem einseitigen Anschluss des Büromoduls an einen Kern ausgegangen.
- Der Böschungswinkel der Baugrube beträgt  $45^\circ$ .
- Der Arbeitsraum zwischen Baugrube und Kellerwand beträgt 1,50 m.
- Es wird eine Bodenplatte mit 20 cm Dicke auf einer kapillarbrechenden Kiesschicht mit ebenfalls 20 cm Dicke eingebaut.

Die entsprechenden Volumen für Aushub, Lagerung, Verfüllung etc. werden gemäß Abbildung berechnet.

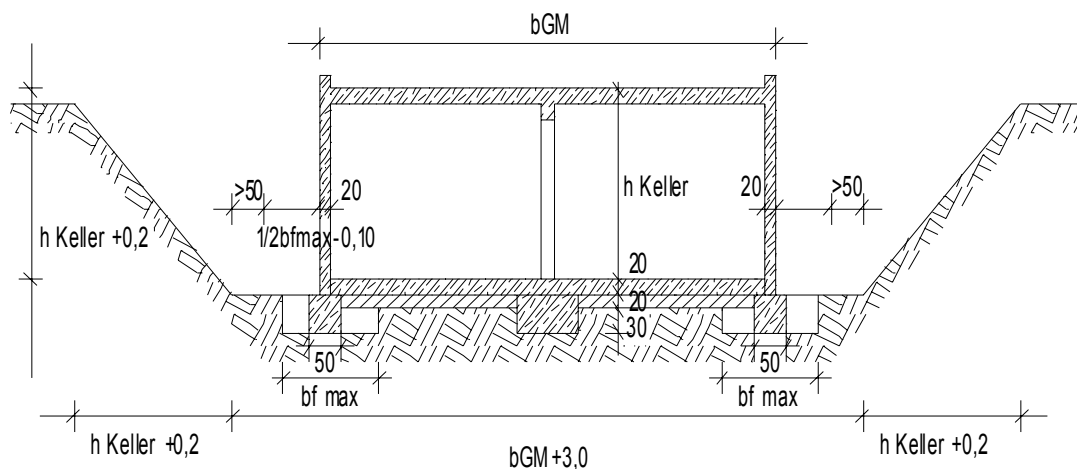


Abbildung 5-3: Querschnitt Baugrube

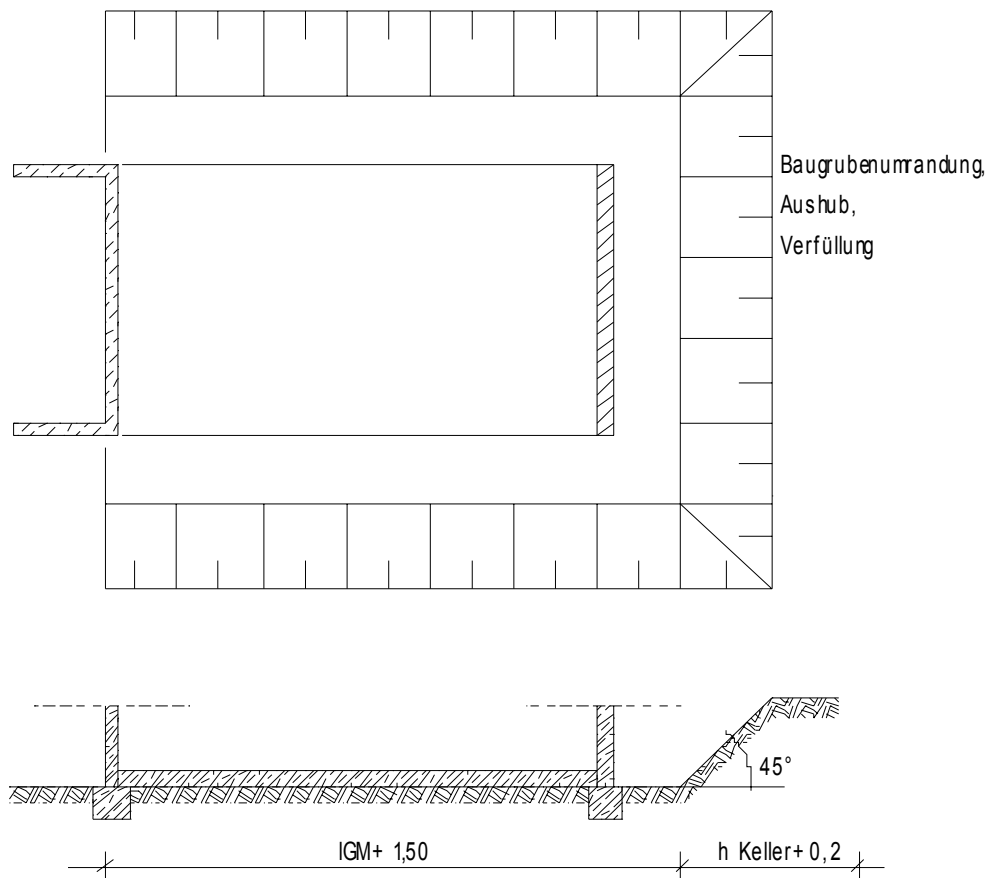


Abbildung 5-4: Grundriss und Längsschnitt Baugrube

#### 5.2.1.1.2 Gründung

Für die Untersuchungen in dieser Arbeit wird eine Gründung bestehend aus einem umlaufenden Streifenfundament und Einzelfundamenten unterhalb der Stützen angenommen. Die Einzelfundamente der Stützen werden nach EC 2 berechnet. Die wesentlichen Kosteneinflüsse bei den Herstellkosten sind:

- Betonmenge
- Gewicht Bewehrungsstabstahl
- Schalfläche
- erforderlicher Aushub (wird bei Erdarbeiten, Baugrube berücksichtigt).

Die Streifenfundamente werden pauschal pro laufenden Meter berechnet. Die Streifenfundamente unterhalb der Stirnwände müssen die Lasten aus den Stirnwänden zuzüglich den Auflagerlasten der Randfelder in den Boden ableiten. Es wird hierfür ein Fundamentquerschnitt von  $b/h=50/80$  cm angenommen. Die Streifenfundamente unter den Längswänden werden konstruktiv mit  $b/h=50/50$  cm ausgeführt.



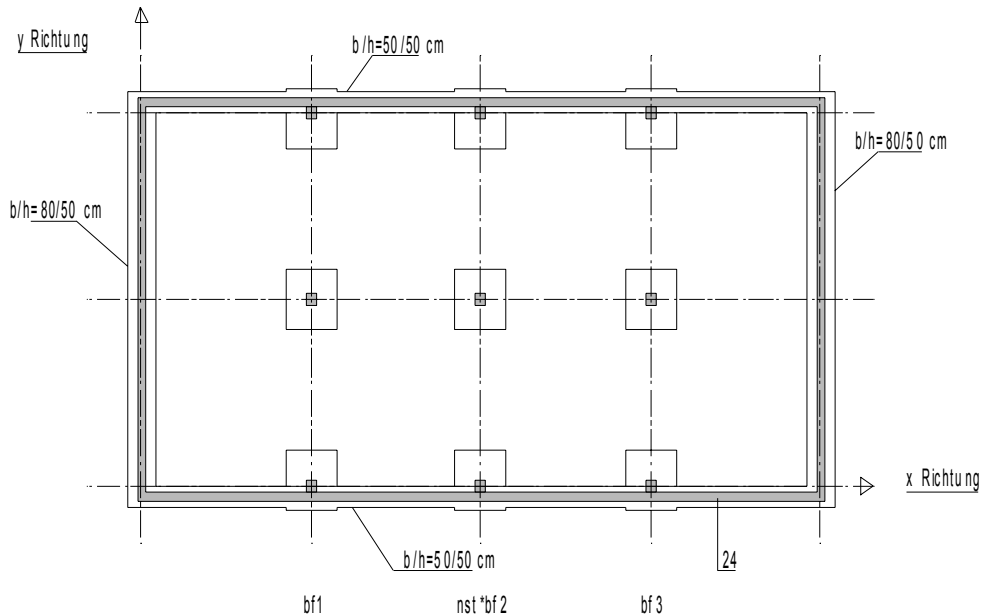


Abbildung 5-5: Gründung Büromodul

Die Sohlplatte wird mit einer Stärke von 20 cm ausgeführt. Unterhalb der Platte werden eine Trennfolie und eine kapillarbrechende Kiesschicht mit ebenfalls 20 cm angeordnet. In der Fundamentsohle wird eine konstruktive zweilagige Mattenbewehrung mit Q 188 Matten vorgesehen.

#### 5.2.1.1.3 Stirnwände

Die Stirnwände werden als Stahlbetonscheiben ausgeführt. Diese Scheiben dienen mit dem gegenüberliegenden Kern als Aussteifung des Büromoduls. Die Wandscheiben werden unabhängig von der Bauweise in Stahlbeton ausgeführt. Für die Berechnung der Herstellkosten der Stirnwände werden folgende Annahmen getroffen:

- Die Wanddicke beträgt 24 cm.
- Die Wandhöhe wird im Zusammenhang mit einer umlaufenden Attika 50 cm über die Oberkante der Dachkonstruktion geführt.
- Die Stirnwand wird vereinfachend als geschlossen angenommen. Etwaige Öffnungen für Fenster und Fassaden werden vereinfachend bei den Rohbaukosten nicht berücksichtigt. Mögliche Öffnungen werden bei den Ausbaukosten berücksichtigt.
- In der Berechnung der Herstellkosten wird die Stirnwand beidseitig des Büromoduls eingerechnet.
- Die Bewehrung dieser Wandscheiben erfolgt mit zwei Lagen Q 188 Matten und einer Stabstahlbewehrung von etwa 30 kg/m<sup>3</sup>.

#### 5.2.1.1.4 Kellerwand

Unter der Voraussetzung, dass das Gebäude unterkellert werden soll, wird eine Kellerwand notwendig. Es wird hierbei angenommen, dass die Kellerwand mit einer Stärke von 20 cm ausreichend tragfähig ist. Die Kellerwand wird für horizontalen Erddruck aus Anschüttung und Verkehrslast bemessen. Die Lasten aus Stützen werden durch entsprechende Kellerstützen in die Fundamente abgeleitet. Bei der Berechnung der Kellerwand wird davon ausgegangen, dass die Wand durch die Sohl- und Deckenplatte ausreichen horizontal gehalten

#### 5.2.1.1.5 Außen-, Innenstützen

Die tragenden Außen- und Innenstützen werden von der Bauweise abhängig berechnet. Es werden zwei Bauweisen, die Ortbeton- und die Stahlverbundbauweise miteinander verglichen. Bei einer Ausführung in Ortbeton wird der Minstdurchmesser bzw. die Minstdicke auf 30 cm festgelegt. In Stahlverbundbauweise werden die Stützen mit Kammerbeton versehen, um einen entsprechenden Brandschutz zu gewährleisten.

- Stütze in Ortbeton:  
Stahlbetonstützen werden im Zusammenhang mit einer Ortbetonbauweise als Rechteck- oder Rundstützen ausgebildet. Es wird nach EC 2 eine der Belastung bzw. der Mindestbewehrung entsprechende Bewehrung berechnet. Ist die Belastung zu groß, dann wird der Stützquerschnitt vergrößert. Die wesentlichen Positionen zur Berechnung der Herstellkosten einer Stahlbetonstütze sind Betonmenge, Stabstahlgewicht und Schalfläche.
- Stahlverbundstütze:  
Bei Stahlverbundstützen ist der Brandschutz ein wesentliches Kriterium für die Gebrauchstauglichkeit der Stützen. Um einen ausreichenden Brandschutz mit F90 zu erreichen, werden die Stützen als kammergefüllte HEA-Walzprofile ausgeführt. Die Berechnung der Stützen erfolgt nach EC 4. Der Nachweis im Brandfall wird in Anlehnung an [17] durchgeführt. Die Kosten für eine Stahlverbundstütze setzen sich aus den Kosten für den Profilstahl, den Kosten für den Kammerbeton und den Kosten für zusätzliche Bewehrung des Kammerbetons zusammen.

#### 5.2.1.1.6 Decken-, Dachkonstruktion

Die Decken- bzw. Dachkonstruktion wird als zweiachsig gespannte Flachdecke oder einachsig gespannt als Deckenplatte auf Unterzügen ausgeführt. Bei der Ausführung mit Unterzügen sind folgende Konstruktionsarten möglich:

- Stahlbetondecke aus Elementdecken mit Aufbeton und Stahlbetonträgern
- Stahlbetondecke aus Elementdecken mit Aufbeton und Verbundträgern
- Verbunddecke mit Verbundträgern.

#### 5.2.1.2 Ausbaukosten

Alle von der Entwurfsgeometrie abhängigen Kosten der nichttragenden Teile werden zu den Ausbaukosten zusammengefasst. Dabei sind diese Kosten durch die individuell gewünschten Standards verschieden. Die verschiedenen Möglichkeiten und zugehörigen Kosten werden in einer Datenbank gespeichert, so dass für jeden Optimierungs- und Berechnungslauf die Einheitspreise aus der Datenbank eingelesen werden können. In Abhängigkeit von konjunkturellen Schwankungen können die Preisdaten flexibel verändert werden.

Die wichtigsten Kosten sind hierbei:

- Kosten Dachaufbau
- Kosten Längsfassade
- Kosten Außenwandbekleidung Stirnwand
- Kosten für Dämmung der Sohlplatte bei nicht unterkellerten Gebäuden
- Kosten für leichte Trennwände
- Kosten für Fußboden
- Kosten für Deckenbekleidung
- Kosten für Installation (Elektro, Heizung, Lüftung)
- Kosten für aktiven Brandschutz (Sprinkleranlage).

Die unter Punkt 1 bis 4 genannten Kosten sind direkt von den Vorgaben der Planer bzw. des Bauherrn abhängig. Damit werden auch die Lasten und der Jahresheizenergiebedarf beeinflusst. Neben den Einheitspreisen werden die notwendigen Daten in entsprechenden Datenbanken vorgehalten.

Neben speziellen Trennwandsystemen, die in einer Datenbank gespeichert sind, werden verschiedene Standardlösungen vorgesehen. Der Einfluss des Trennwandgewichts auf die Belastung wird separat gesteuert.

Die Kosten für den aktiven Brandschutz, z. B. Einbau einer Sprinkleranlage, werden vereinfachend mit 75 DM/m<sup>3</sup> BRI angesetzt. Dieser einfache Ansatz reicht für die in dieser Arbeit durchgeführten Vergleiche aus. Wie später noch gezeigt wird, sind bei dem betrachteten Vergleichsobjekt keine Öffnungen in den Geschossdecken vorgesehen und die einzelnen Brandabschnitte sind so klein, dass kein aktiver Brandschutz notwendig wird. In weiterführenden Untersuchungen kann das Thema Brandschutz genauer bearbeitet und das in dieser Arbeit vorgestellte System durch ein entsprechendes Programmmodul ergänzt werden.

Zur Berechnung der Installationskosten wird in dieser Arbeit ein auf die Bruttogeschossfläche bzw. auf den Bruttorauminhalt bezogener Ansatz gewählt. Die Kosten der Installation werden aufgeteilt in Heizungs- und Wasserinstallation und in Elektroinstallation.

Die Installationskosten für Heizung und Wasser werden pauschal über den BRI berechnet. Die Kosten der Elektroinstallation werden unterteilt in allgemeine und in Kosten, die von der Kabelführung und der notwendigen Verteilung abhängen.

### 5.2.2 Baunutzungskosten

Unter den Baunutzungskosten werden die Kosten verstanden, die zum Betrieb bzw. zur Nutzung des Gebäudes notwendig sind. Nach DIN 18960 werden die Baunutzungskosten eingeteilt in:

- 1 Kapitalkosten
- 2 Abschreibung
- 3 Verwaltungskosten
- 4 Steuern
- 5 Betriebskosten
  - 5.1 Gebäudereinigung
  - 5.2 Wasser und Abwasser
  - 5.3 Wärme und Kälte
  - 5.4 Strom
  - 5.5 Bedienung
  - 5.6 Wartung
  - 5.7 Verkehr- und Grünflächen
  - 5.8 Sonstiges
- 6 Bauunterhaltung.

Ausführliche Untersuchungen zu Baunutzungskosten und Betriebskosten haben Simons [84] und Dyllich-Brenzinger [19] vorgenommen. Im Zusammenhang mit der in dieser Arbeit verfolgten ganzheitlichen Entwurfsoptimierung sind nur solche Baunutzungskosten von Interesse, die direkt durch den Entwurf beeinflusst werden. So sind Verwaltungskosten und Steuern unabhängig von der Entwurfslösung und werden daher nicht weiter betrachtet [18]. Das Thema der Bauunterhaltung ist sehr komplex und wird hier nicht weiter untersucht. Es ist jedoch bei einem Vergleich von Beton- und Verbundbauweise von Interesse, welche Bauweise in der Bauunterhaltung günstiger ist. Dies stellt einen weiteren Ansatz für ein Beurteilungskriterium im Zusam-

menhang mit der hier vorgestellten ganzheitlichen Betrachtungsweise dar und kann ein Ansatz für weitergehende Forschungen auf diesem Gebiet sein.

Die Betriebskosten lassen sich in drei Kategorien von Kosten einteilen:

- Gebäudeabhängige Kosten
- Nutzerabhängige Kosten und
- Gebäude- und Nutzerunabhängige Kosten.

Unter den gebäudeabhängigen Kosten versteht man Kosten, die von der Form, der Geometrie, der Ausrichtung etc. abhängen. Dies sind die Kosten für Gebäudereinigung, die Kosten für Wärme und Kälte sowie die Stromkosten. Wobei die Stromkosten im Zusammenhang mit der Kategorie gebäudeabhängige Kosten genauer differenziert werden müssen (siehe hierzu Kapitel 5.2.2.4).

Die nutzerabhängigen Kosten sind Kosten, die direkt durch die Nutzer eines Gebäudes verursacht werden. So sind beispielsweise die Wasser- und Abwasserkosten größtenteils von der Anzahl der Personen, die in dem Gebäude arbeiten, abhängig. Bei einer Entwurfsaufgabe, bei der die Anzahl der Arbeitsplätze vorgegeben ist, hat der von dieser Personenanzahl abhängige Wasserverbrauch keinerlei Einfluss auf die Entwurfslösung. Das bedeutet, dass diese Betriebskosten vom Entwurf unabhängig sind. Deshalb wird diese Kategorie nicht für eine ganzheitliche Beurteilung verschiedener Entwurfsalternativen herangezogen.

Im Zuge moderner ökologischer Planungen wird versucht, Bürogebäude ohne Klimaanlage auszuführen. Das bedeutet, dass für die Klimaregulierung entsprechende Speichermassen und eine natürliche Lüftung vorgesehen werden. Aus diesem Grund und aus dem Grund, dass das gewählte Vergleichsobjekt ohne Klimaanlage ausgeführt wurde, wird hier auf eine Berücksichtigung von Klimaanlage verzichtet. Es werden nur die Betriebskosten für die Wärme berücksichtigt.

Die Kosten für Bedienung, Wartung, Verkehr- und Grünflächen sowie für Sonstiges, als Teil der Betriebskosten, sind vom Gebäudeentwurf unabhängig und werden daher in dieser Arbeit nicht näher behandelt.

Aus diesen Überlegungen heraus werden die Baunutzungskosten auf solche Kostengruppen reduziert, die durch die Entwurfsgeometrie beeinflusst werden und somit für eine ganzheitliche Entwurfsoptimierung von Interesse sind. Diese Kostengruppen sind:

- Kapitalkosten und Abschreibung,
- Kosten für Gebäudereinigung,
- Heizkosten und
- Kosten für Belichtung (Strom).

#### 5.2.2.1 Kapitalkosten und Abschreibung

Es gibt im wesentlichen zwei Verfahren zur Berechnung von Kapitalkosten und Abschreibung.

Vereinfachtes Verfahren:

$$A + V = \frac{K}{n} + K \cdot \frac{p}{2} \quad (Gl. 5-1)$$

*A ..... Abschreibung*

*V ..... Kapitalkosten, Verzinsung*

*K ..... Investiertes Kapital*

*n ..... Nutzungsdauer*

*p ..... kalkulatorischer Zinssatz (siehe auch Kapitel 5.5)*

Berechnung mittels Annuität:

$$\text{Annuität} = K \cdot \frac{q^n \cdot p}{q^n - 1} \quad (\text{Gl. 5-2})$$

$$q = 1 + \frac{p}{100} \quad (\text{Gl. 5-3})$$

*Annuität .....jährlich gleichbleibender Betrag von Abschreibung und Verzinsung*

*K.....Investiertes Kapital*

*n.....Nutzungsdauer*

*p.....Zinssatz*

*p.....kalkulatorischer Zinssatz*

Bei diesem Verfahren wirkt sich der Anteil der investitionsabhängigen Kosten stärker aus als beim vereinfachten Verfahren. Es bleiben jedoch ebenfalls die zukünftigen Preisentwicklungen unberücksichtigt. In der Regel ist es bedeutungslos, welches Verfahren angewendet wird. Bei etwa vergleichbaren Verhältnissen ist die Reihenfolge der Optimalität der Alternativen unabhängig vom Verfahren [18].

Für die Berechnungen im Rahmen dieser Arbeit wird eine Nutzungsdauer von 25 Jahren festgelegt. Die jährlichen Kosten für Abschreibung und Verzinsung werden mit dem vereinfachten Verfahren berechnet.

#### 5.2.2.2 Gebäudereinigung

Die Gebäudereinigung wird nach DIN 18960 in Innenreinigung, Fensterreinigung und Fassadenreinigung aufgeteilt. Die Innenreinigung bezieht sich auf die Fußböden und Wandflächen, die Fensterreinigung auf die Fenster und die Fassadenreinigung auf die restliche äußere Gebäudehülle.

Einen großen Einfluss bei der Berücksichtigung der Gebäudereinigung in den Baunutzungskosten hat die Reinigungshäufigkeit. In der Regel wird die Innenreinigung ein- oder mehrmals je Woche durchgeführt. Die Fensterreinigung erfolgt in größeren Abständen ein- oder mehrmals im Jahr. Die Fassadenreinigung jedoch kann in Intervallen von mehr als einem Jahr durchgeführt werden. Aus diesem Grund ist es nicht günstig, die Kosten für die Fassadenreinigung in die jährlichen Baunutzungskosten einzurechnen.

Es werden also für die Berechnung der Reinigungskosten nur die Kosten für Innenreinigung und die Kosten für die Fensterreinigung angesetzt. Dies erscheint auch im Hinblick auf die Abhängigkeit von der Entwurfsgeometrie sehr sinnvoll, da sowohl die Reinigungsflächen als auch die Fensterflächen von der Gebäudegeometrie abhängen.

##### 5.2.2.2.1 Innenreinigung

Dyllich-Brenzinger [19] schlägt ein Berechnungsverfahren vor, welches ebenfalls nur die Innenreinigung und die Fensterreinigung enthält:

$$RK_I = \sum RF_i \cdot H \cdot \frac{1}{L} \cdot V \quad (\text{Gl. 5-4})$$

*RK<sub>I</sub>.....Gesamtreinigungskosten [DM/m²a]*

*RF<sub>i</sub>.....Reinigungsfläche i [m²]*

*H.....Reinigungshäufigkeit pro Jahr [Anzahl/a]*

*L.....Reinigungsleistung [m²/h]*

*V.....Stundenverrechnungssatz [DM/h]*

Die unterschiedlichen Reinigungsflächen sind Hauptnutzfläche, Nebennutzfläche ohne Nassräume, Nassräume, Flure und Treppenhäuser und Eingangsbereich. Da das untersuchte Grundmodul nur aus Büro- und Verkehrsflächen besteht, wobei bei Kombibüros meistens der gleiche Fußbodenbelag in Einzelzellen und Gemeinschaftszone verwendet wird, kann auf eine genaue Einteilung der Flächen verzichtet werden. Daher wird bei den Untersuchungen vereinfachend die gesamte Reinigungsfläche gleich der BGF gesetzt. Abzüge für Konstruktionsflächen und Trennwandflächen werden hier vernachlässigt, da die Unterschiede bei verschiedenen Entwürfen mit gleicher Raumanzahl sehr klein sind.

Wie bereits gesagt, sind bei Kombibüros meistens die Fußbodenbeläge innerhalb eines Geschosses gleich. Bei dem gewählten Vergleichsobjekt der Edding AG stimmt diese Aussage. Daher wird ein flächenbezogener Kostenansatz aus Reinigungshäufigkeit, Reinigungsleistung und Stundenverrechnungssatz ermittelt.

$$RK_I = BGF \cdot RK_{IF} \quad (Gl. 5-5)$$

$RK_I$  ..... Gesamtkosten Innenreinigung [DM/m<sup>2</sup>a]

$RK_{IF}$  ..... flächenbezogene Reinigungskosten [DM/m<sup>2</sup>]

$BGF$  ..... Bruttogeschossfläche [m<sup>2</sup>]

Dieser Kostenansatz wird sowohl über das Verfahren nach Dyllich-Brenzinger [19] als auch über die Auswertung der aktuellen Kostendaten der Edding AG ermittelt.

#### 1) Berechnung der flächenbezogenen Reinigungskosten nach [19]:

Es wird eine durchschnittliche Reinigungsleistung von 180 m<sup>2</sup>/h für Teppichboden angenommen. Die Reinigung erfolgt täglich gemäß Angabe der Edding AG. Das ergibt eine Reinigungshäufigkeit von 250/a. Der aktuelle Tariflohn inklusive Zuschlägen kann nach Rückfragen mit verschiedenen Reinigungsfirmen für 1999 zwischen 27,23 DM/h und 28,60 DM/h angesetzt werden. Es wird der Mittelwert von 27,92 DM/h verwendet. Aus diesen Daten errechnen sich die flächenbezogenen Kosten für die Innenreinigung zu:

$$RK_{IF} = \frac{1}{180} \cdot 250 \cdot 27,92 = 38,78 \frac{DM}{m^2 a} \quad (Gl. 5-6)$$

#### 2) Berechnung durch Auswertung der Gebäudedaten der Edding AG:

Laut Angabe der Edding AG fallen für die Innenreinigung bei täglicher Reinigung der Flächen 146.000 DM an. Die Reinigungsflächen können überschlägig aus den Flächen der Büroschosse und der Fläche der Erschließungsstraße berechnet werden.

Bürofläche	10·16,2·19,50 =	3159,00 m <sup>2</sup>
Erschließungsstraße	2·49,20·6,50 =	639,60 m <sup>2</sup>
Summe		3798,60 m <sup>2</sup>

Aus den Gesamtkosten und der Reinigungsfläche ergeben sich die flächenbezogenen Kosten für die Innenreinigung zu:

$$RK_{IF} = \frac{146.000}{3798,60} = 38,44 \frac{DM}{m^2 a} \quad (Gl. 5-7)$$

Da die Ergebnisse der beiden Berechnungen sehr ähnlich sind, werden die flächenbezogenen Kosten der Innenreinigung ausreichend genau zu **38,50 DM/m<sup>2</sup>** festgelegt.

#### 5.2.2.2.2 Fensterreinigung

Unter der Fensterreinigung wird im Zusammenhang dieser Arbeit die Reinigung aller Fensterflächen und der verglasten Flächen einer vorgehängten Fassade verstanden.

Die Fensterreinigung kann nach Dyllich-Brenzinger als Summe der Kosten für die Reinigung von Außenflächen, für Innenflächen, für Rahmen außen, für Rahmen innen und sofern vorhanden für den Sonnenschutz ermittelt werden. Dabei werden die Kosten durch die Multiplikation der einzelnen Flächenanteile mit der Reinigungshäufigkeit und dem Einheitspreis berechnet. Dieser Ansatz erscheint einfach und sinnvoll und wird daher übernommen. Für die Reinigungshäufigkeit wird angenommen, dass die Fenster zweimal im Jahr komplett, d.h. außen + innen, gereinigt werden. In [19] sind Einheitspreise für die Fensterreinigung auf der Basis von Literaturrecherchen und Umfragen für das Bezugsjahr 1977 angegeben. Da sich die Reinigungstechnik für Fenster in den letzten Jahren nicht geändert hat und somit nur die Kosten für Lohn und Betriebsmittel erhöht haben, können die Einheitspreise durch Multiplikation eines Korrekturfaktors, der aus der Entwicklung der Preisindizes errechnet wird, auf den aktuellen Stand gebracht werden. Die Preisindizes für Lebenshaltung haben sich von 1977 bis 1997 von 176,6 auf 308,4 (1962=100) erhöht. Mit einer Extrapolation auf 1999 kann man von einer Verteuerung um den Faktor 1,80 ausgehen.

Jahr	Einheitspreis
1977	1,50 DM/m <sup>2</sup>
1999	2,70 DM/m <sup>2</sup>

*Tabelle 5-3: Einheitspreis für Fensterreinigung*

Bei zweimaliger Reinigung pro Jahr ergibt sich ein Einheitspreis von 5,40 DM/m<sup>2</sup>a.

Die Kosten für Fensterreinigung belaufen sich beim Vergleichsobjekt der Edding AG auf ungefähr 10.000 DM/a, wobei keine Reinigungshäufigkeit angegeben werden konnte. Die zu reinigende Fensterfläche beträgt bei der Edding AG ungefähr 1510 m<sup>2</sup>. Daraus berechnet sich ein Einheitspreis von 6,62 DM/m<sup>2</sup> a.

Für die Berechnung der Fensterreinigung werden folgende Annahmen getroffen:

- Die Kosten für die Fensterreinigung setzen sich aus den Kosten für die Reinigung der Fenster der Längsfassade und den Kosten für die Reinigung der Fenster in den Stirnwänden zusammen.
- Die Fensterfläche der Längsfassade wird anteilig aus der gesamten Fassadenfläche berechnet. Der Anteil der Fensterfläche wird über einen Eingabeparameter der Fassadenbeschreibung gesteuert.
- Die Fensterfläche der Stirnwände berechnet sich aus der Differenz der Breite der Wandscheiben und der Breite des Grundmodul mal der Gebäudehöhe. Es wird hierbei angenommen, dass die Fassaden in den Stirnwänden komplett verglast sind.
- Die Reinigungskosten pro Quadratmeter Fensterfläche werden zu **6,50 DM/m<sup>2</sup>a** angenommen

Somit berechnen sich die Kosten für die Fensterreinigung zu

$$KR_F = (A_{Fas} \cdot f_{Fas} + 2 \cdot bGM \cdot (hGM + 0,50) - A_{SW}) \cdot 6,50 \frac{DM}{a} \quad (Gl. 5-8)$$

$KR_F$ ..... Gesamtkosten Fassadenreinigung [DM/m<sup>2</sup>]

$A_{Fas}$ ..... Fassadenfläche [m<sup>2</sup>]

$f_{Fas}$ ..... Fensteranteil Fassadenfläche [-]

$bGM$ ..... Breite Grundmodul [m]

$hGM$ ..... Höhe Grundmodul [m]

$A_{SW}$ ..... Fläche Stirnwand [m<sup>2</sup>]

### 5.2.2.3 Heizkosten

Zur Berechnung der jährlichen Heizkosten wird ein Ansatz gewählt, der auf der momentanen WSchVO basiert. Dieses Verfahren wird auch als Jahresbilanzverfahren bezeichnet. Hierzu wird der jährliche Heizenergiebedarf berechnet. Zusätzlich zur vereinfachten Berechnung wird nach DIN 4108-6 die Speicherefähigkeit massiver Bauteile berücksichtigt, die sich in der Berechnung des Nutzungsgrades solarer und interner Wärmegewinne widerspiegelt.

Der Jahresheizwärmebedarf berechnet sich zu

$$Q_H = r_T \cdot Q_{V,a} - \eta \cdot Q_{G,a} \quad (\text{Gl. 5-9})$$

$Q_H$  ..... Jahresheizwärmebedarf [kWh/a]  
 $r_T$  ..... Teilbeheizungsfaktor  
 $Q_{V,a}$  ..... Wärmeverlust durch Transmission und Lüftung [kWh/a]  
 $Q_{G,a}$  ..... Wärmegewinn [kWh/a]  
 $\eta$  ..... Jahres-Nutzungsgrad der Wärmegewinne

Der Wärmeverlust berechnet sich zu

$$Q_{V,a} = 0,0024 \cdot G_{t_x} \cdot (H_T + H_L) \quad (\text{Gl. 5-10})$$

$Q_{V,a}$  ..... Wärmeverlust durch Transmission und Lüftung [kWh/a]  
 $0,0024$  ..... Umrechnungsfaktor Heizgradtagzahl in [kWh]  
 $G_{t_x}$  ..... Heizgradtagzahl zur Heizgrenztemperatur [Kd]  
 $H_T$  ..... temperaturspezifischer Transmissionswärmeverlust [W/K]  
 $H_L$  ..... temperaturspezifischer Lüftungswärmeverlust [W/K]

Der Teilbeheizungsfaktor kann nach Hauser [35] pauschal zu 0,9 festgelegt werden. Der Transmissionswärmeverlust ergibt sich aus dem temperaturspezifischen Verlust durch die Außenbauteile.

Der temperaturspezifische Transmissionswärmeverlust berechnet sich zu

$$H_T = \sum r_i \cdot k_i \cdot A_i \quad (\text{Gl. 5-11})$$

$r_i$  ..... Reduktionsfaktoren für Bauteile  
 $k_i$  ..... Wärmedurchgangskoeffizient der Bauteile [W/(m²K)]  
 $A_i$  ..... Bauteilfläche [m²]

Die Heizgradtagzahl liegt für verschiedene Städte und Temperaturen tabellarisch vor. Diese Tabelle ist über eine Datenbank Anwendung im Programm enthalten. Die Reduktionsfaktoren werden nach DIN 4108 vorgegeben. Die jeweiligen Bauteilflächen werden programmseitig automatisch ermittelt. Die für die Berechnung erforderlichen Wärmedurchgangskoeffizienten werden für jedes Bauteil extra in einer Bauteildatenbank angegeben.

Der Lüftungswärmeverlust berechnet sich zu

$$H_L = 0,34 \cdot n \cdot V_n \quad (\text{Gl. 5-12})$$

$0,34$  ..... Standardwert für Dichte und spez. Wärmekapazität der Luft [Wh/(m³K)]  
 $n$  ..... Luftwechsel im Raum [1/h]  
 $V_n$  ..... Nettovolumen des Baukörpers [m³]

Für die Berechnung wird eine natürliche Belüftung mit einem standardisierten Luftwechsel von 0,8 1/h angenommen. Das Nettovolumen des Baukörpers kann vereinfachend zu 80% des gesamten Baukörpervolumens angenommen werden.



Der Wärmegewinn berechnet sich zu

$$Q_{G,a} = Q_I + Q_S \quad (\text{Gl. 5-13})$$

$Q_I$ .....Interne Wärmegewinne [kWh/a]

$Q_S$ .....Solare Wärmegewinne [kWh/a]

Der interne Wärmegewinn berechnet sich für Bürogebäude nach DIN 4108 zu

$$Q_I = 11,80 \cdot V \quad (\text{Gl. 5-14})$$

11,80 .....Volumenbezogene interne Wärmegewinne bei Bürobauten [kWh/(m³a)]  
nach DIN 4108, Teil 6

$V$ .....Bruttovolumen des Baukörpers [m³]

In Abhängigkeit der Himmelsrichtung berechnet sich der solare Wärmegewinn zu

$$Q_S = z \cdot f_v \cdot \sum I_{s,a} \cdot \sum (0,85 \cdot g_i \cdot A_i) \quad (\text{Gl. 5-15})$$

$z$  .....Minderungsfaktor infolge Verschattung oder Sonnenschutz

$f_v$  .....verglaster Fensteranteil

$I_{s,a}$  .....mittlere jährliche Strahlungsintensität abhängig von der Himmelsrichtung [W/m²]

0,85 .....Korrekturfaktor zur Berechnung des effektiven Gesamtenergiedurchlassgrads

$g_i$  .....Gesamtenergiedurchlassgrad der Fenster

$A_i$  .....Fensterfläche [m²]

Der Minderungsfaktor infolge Verschattung kann in der Regel vereinfachend mit 0,90 angenommen werden, da meistens nur eine geringe Verschattung vorliegt. Infolge der üblichen Rahmenanteile der Fenster von 30% wird der verglaste Fensteranteil zu 0,70 festgelegt. Die mittlere jährliche Strahlungsintensität wird nach DIN EN 832 festgelegt.

Orientierung	Durchschnittliche jährliche Strahlungsintensität
Süd	365 kWh/(m²a)
West/Ost	242 kWh/(m²a)
Nord	142 kWh/(m²a)

Tabelle 5-4: Durchschnittliche jährliche Strahlungsintensität

Der Gesamtenergiedurchlassgrad ist von den verschiedenen Fensterarten abhängig. Im Zusammenhang mit der vergleichenden Untersuchung der Edding AG wird der Gesamtenergiedurchlassgrad für die Verglasung bei den Daten der Längsfassade und der Giebelwand abgespeichert.

Wichtig bei der Berechnung des Jahresheizenergiebedarfs ist der Nutzungsgrad der Wärmegewinne. In der DIN 4108 ist dafür ein pauschaler Nutzungsgrad von 0,85 vorgesehen. In der DIN EN 832 wird jedoch eine Möglichkeit vorgesehen, den Nutzungsgrad in Abhängigkeit einer wirksamen Speicherefähigkeit des Gebäudes zu berechnen. Durch dieses Verfahren kann der Effekt der Wärmespeicherung und der zeitlich versetzten Wärmeabgabe berücksichtigt und somit der Nutzungsgrad verbessert werden. Aus diesem Grund wird hier für die Berechnung des Nutzungsgrades das Verfahren der DIN EN 832 verwendet.

Ein wichtiger Bestandteil bei der Berechnung des Nutzungsgrades ist die wirksame Speicherefähigkeit.

Diese berechnet sich zu

$$C_{\text{wirk}} = \sum (C_i \cdot \rho_i \cdot d_i \cdot A_i) \quad (\text{Gl. 5-16})$$

$C_i$ ..... spezifische Wärmekapazität der Speicherschicht [J/kg K]

$\rho_i$ ..... Dichte der Speicherschicht [kg/m<sup>3</sup>]

$d_i$ ..... wirksame Dicke der Speicherschicht, die mit Raumluft in Berührung kommt [m]

$A_i$ ..... Fläche der Speicherschicht [m<sup>2</sup>]

Zur Berechnung der wirksamen Speicherfähigkeit werden folgenden Annahmen getroffen:

- Als Speicherschicht kann nur die unverkleidete Betondecke verwendet werden. Bei Anordnung einer Unterdecke kann die Speicherfähigkeit der Betondecke nicht genutzt werden. Nach DIN 4108 wird in diesem Fall der pauschale Nutzungsgrad von 0,85 verwendet.
- Die wirksame Dicke der Speicherschicht darf 10 cm nicht überschreiten. Es gilt darüber hinaus auch die Randbedingung, dass die wirksame Dicke die Hälfte der Schichtdicke nicht überschreiten darf. Aus diesen Randbedingungen heraus wird die wirksame Dicke pauschal für die Berechnungen in dieser Arbeit auf 8 cm festgelegt.

Unter diesen Voraussetzungen berechnet sich die wirksame Speicherfähigkeit des Grundmoduls zu

$$C_{\text{wirk}} = 0,84 \cdot 2400 \cdot 0,08 \cdot (gz + 1) \cdot \text{IGM} \cdot \text{bGM} \quad (\text{Gl. 5-17})$$

0,84..... spezifische Wärmekapazität Beton [J/kg K]

2400..... Dichte Beton [kg/m<sup>3</sup>]

0,08..... wirksame Dicke der Speicherschicht aus Beton [m]

gz..... Geschosszahl (siehe Kapitel 5)

IGM..... Länge Geschossmodul [m]

bGM..... Breite Geschossmodul [m]

Mit der wirksamen Speicherfähigkeit wird ein Hilfwert berechnet:

$$b_a = 0,8 + \frac{C_{\text{wirk}}}{28 \cdot (H_T + H_L)} \quad (\text{Gl. 5-18})$$

Der Nutzungsgrad berechnet sich nun zu

$$\eta = \frac{1 - \left( \frac{Q_{G,a}}{Q_{V,a}} \right)^{b_a}}{1 - \left( \frac{Q_{G,a}}{Q_{V,a}} \right)^{b_a + 1}} \quad \text{bei } \frac{Q_{G,a}}{Q_{V,a}} \neq 1$$

$$\eta = \frac{b_a}{b_a + 1} \quad \text{bei } \frac{Q_{G,a}}{Q_{V,a}} = 1 \quad (\text{Gl. 5-19})$$

Nach Klingele [49] können aus dem jährlichen Heizwärmebedarf folgende Energiekosten berechnet werden:

$$EK_{\text{Wärme}} = K_0 \cdot x \cdot Q_H \quad (\text{Gl. 5-20})$$

$EK_{\text{Wärme}}$ ..... Heizkosten [DM/a]

$K_0$ ..... spezifische Kosten für 1 l Heizöl, 0,55 DM/l

$X$ ..... Einheiten in Liter Heizöl, die zur Erzeugung einer Einheit thermischer Nutzenergie benötigt werden. Nach [69] wird dieser Wert zu 0,130 [l/kWh] angenommen.

$Q_H$ ..... Jahresheizwärmebedarf [kWh/a]

Damit ergeben sich die jährlichen Heizkosten zu

$$EK_{\text{Wärme}} = 0,55 \cdot 0,13 \cdot Q_H = 0,072 \cdot Q_H \text{ [DM/a]} \quad (\text{Gl. 5-21})$$

Der bewertete Energiebedarf unter Berücksichtigung des Primärenergieinhalts der eingesetzten Energieträger beträgt für die Heizkosten

$$EB_{\text{Wärme}} = 1,11 \cdot Q_H \quad (\text{Gl. 5-22})$$

$EB_{\text{Wärme}}$  .....bewerteter Jahresheizenergiebedarf [kWh/a]  
1,11 .....primärenergetischer Bewertungsfaktor nach [35]

#### 5.2.2.4 Kunstlicht-Strombedarf

Für Büroarbeiten ist eine ausreichende Beleuchtung erforderlich. Dies bedeutet, dass die jeweiligen Arbeitsplätze so mit Tageslicht und mit Kunstlicht versorgt werden müssen, dass diese geforderte Beleuchtung gewährleistet werden kann. Der Bedarf an Kunstlicht und der daraus resultierende Strombedarf ist von der Baukörpergeometrie und der Ausbildung der Büroräume abhängig. Somit können die Stromkosten für die künstliche Beleuchtung am Arbeitsplatz durch die Entwurfsparameter beeinflusst werden.

Zur Berechnung des jährlichen Kunstlichtstrombedarfs von Bürogebäuden wird ein Verfahren verwendet, welches auf der Ermittlung der mittleren Kunstlichteinschaltzeit für einen repräsentativen Raum und der Berücksichtigung des Beleuchtungswirkungsgrades der lichttechnischen Einrichtung basiert.

Hierbei hat die Berechnung der jährlichen Kunstlichteinschaltzeit eine besondere Bedeutung. Die Kunstlichteinschaltzeit ist die Zeit [h] im Zeitraum von einem Jahr, in der das Kunstlicht eingeschaltet wird. Zur Berechnung dieser Einschaltzeit existieren mehrere Verfahren, die mehr oder weniger einfach anwendbar sind. Hauser [35] hat ein an die DIN 5034 angelehntes Berechnungsverfahren entwickelt, welches sehr einfach und sehr schnell zu Ergebnissen führt und daher in dieser Arbeit verwendet wird.

Die Berechnung der jährlichen Kunstlichteinschaltzeit erfolgt in Abhängigkeit von:

- Regelstrategie
- Geometrie
- Tageslichttransmissionsgrad
- Nennbeleuchtungsstärke

Unter einer Regelstrategie wird die Regelung des Ein- und Ausschaltens der künstlichen Beleuchtung verstanden. In [35] werden verschiedene Regelstrategien definiert:

- Ideale Regelung  
Das Kunstlicht wird ohne zeitliche Verzögerung eingeschaltet, wenn die Nennbeleuchtungsstärke unterschritten, ausgeschaltet, wenn sie überschritten wird.
- Wischimpulsverfahren  
Wenn über einen gewissen Zeitraum (z. B. 60% einer Stunde) die Nennbeleuchtungsstärke überschritten wird, wird das Kunstlicht wieder ausgeschaltet.
- tagweise Regelung  
Wenn das Kunstlicht einmal manuell eingeschaltet wird, wird erst nach Ablauf der täglichen Nutzungszeit das Kunstlicht wieder ausgeschaltet.
- Kunstlicht ist immer während der Nutzungszeit an (ungünstigster Fall für Flure u. ä.).

Auf der sicheren Seite liegend wird für die Berechnung die tagweise Regelung als Regelstrategie verwendet. Im Vergleich der oben beschriebenen Verfahren wird hierbei die höchste jährliche Kunstlichteinschaltzeit und somit der höchste Energiebedarf erreicht.

Bei der Berechnung spielt die Geometrie ebenfalls eine Rolle. Hierbei ist neben der Raumgeometrie auch die Anordnung des Fensters von Bedeutung. Prinzipiell werden zwei Möglichkeiten unterschieden:

- Das Fenster wird bündig mit der Brüstung angeordnet, ohne dass das Fenster bis zur Decke reicht. Dabei wird eine einheitliche Brüstungshöhe von 0,85 m vorgegeben.
- Das Fenster wird bündig mit der Unterkante der Decke angeordnet, ohne dass das Fenster bis zur Brüstung reicht.

Da eine günstige Belichtung von der Oberkante des Fensters abhängt und die Belichtung besser wird, je höher das Fenster angeordnet ist, wird hier die Anordnung 2 (Fenster bündig mit Decke) verwendet.

Der Tageslichttransmissionsgrad ist von der Verglasungsart abhängig. Für eine Wärmeschutzverglasung beträgt der Tageslichttransmissionsgrad 0,76, für eine Sonnenschutzverglasung 0,50. Für andere Verglasungsarten kann der Wert zwischen 0,3 und 0,80 variieren. Der Tageslichttransmissionsgrad kann als freie Variable in die Berechnung eingegeben werden und ist mit 0,76 vorgegeben.

Die Nennbeleuchtungsstärke als Maß zur Berechnung der Kunstlichteinschaltzeit ist in DIN 5035 vorgegeben. Für Bürogebäude sind folgende Nennbeleuchtungsstärken erforderlich:

Anforderung an Helligkeit	Nennbeleuchtungsstärke
Hoch (Arbeitsplatz im Raum)	500 Lux
Normal (Arbeitsplatz am Fenster)	300 Lux
Andere	125 ... 700 Lux

Tabelle 5-5: Nennbeleuchtungsstärke für Bürogebäude

Die Nennbeleuchtungsstärke kann ebenfalls manuell in die Berechnung eingegeben werden und ist mit 300 Lux vorgegeben.

Die jährliche Kunstlichteinschaltzeit berechnet sich zu

$$t_k = \frac{1}{(a_1 \cdot X_{R,F} + a_2)} + a_3 \quad (\text{Gl. 5-23})$$

$t_k$ ..... Kunstlichteinschaltzeit [h/a] für Südorientierung

$X_{R,F}$ ..... Kenngröße für Geometrie, Transmissionsgrad und Nennbeleuchtungsstärke

$a_1, a_2, a_3$ ..... Koeffizienten in Abhängigkeit der Regelungsstrategie

Die Koeffizienten für die Regelstrategien sind in nachfolgender Tabelle zusammengestellt:

Regelung	KOEFFIZIENTEN		
	a1	a2	a3
1.) ideal	309,060	4,33146 E -04	152,344
2.) Wischimpuls	121,463	4,09609 E -04	50,819
3.) tagweise	3117,931	4,76021 E -04	353,218

Tabelle 5-6: Koeffizienten für Regelungsstrategie [35]

Die Kenngröße  $X_{R,F}$  berechnet sich in Abhängigkeit der Fensteranordnung (Fensteroberkante bündig mit Decke) zu

$$X_{R,F} = k_1 \cdot k_2 \cdot \tau_{D65}^{2,2} \cdot f_F^{1,0} \cdot h_{lr}^{1,8} \cdot t_{str}^{-2,7} \cdot b_{str}^{0,39} \cdot E_{nenn}^{-1,48} \cdot \rho_w^{0,42} \quad (Gl. 5-24)$$

$k_1=0,70$  ..... Schwächungsfaktor für Lichttransmission, Konstruktionsanteil

$k_2=0,90$  ..... Schwächungsfaktor für Lichttransmission, Verschmutzung

$\tau_{D65}$  ..... Tageslichttransmissionsgrad

$f_F$  ..... Fensterflächenanteil

$h_{lr}$  ..... lichte Raumhöhe [m]

$t_{str}$  ..... Tiefe Standardraum [m]

$b_{str}$  ..... Breite Standardraum [m]

$E_{nenn}$  ..... Nennbeleuchtungsstärke [Lux]

$\rho_w=0,50$  ..... Reflexionsgrad Wandflächen nach DIN 5034

Die Kunstlichteinschaltzeiten sind von der geographischen Ausrichtung der Wandflächen abhängig. Die Einschaltzeiten für Nord-, Ost- und Westorientierung werden über einen Korrekturfaktor der Einschaltzeit für die Südorientierung berechnet. Dieser Korrekturfaktor kann bei tagweiser Regelung pauschal mit einem Wert von 1,05 angesetzt werden [35].

Für die hier gewählte Regelungsstrategie 3 (tagweise Regelung) kann die Einschaltzeit für die Nordorientierung berechnet werden zu

$$t_{k,N} = 1,05 \cdot t_k \quad (Gl. 5-25)$$

$t_{k,N}$  ..... Einschaltzeit Nordorientierung

$t_k$  ..... Einschaltzeit Südorientierung nach (Gl. 6-22)

Die Einschaltzeiten für die Ost- und Westorientierung berechnen sich zu

$$t_{k,O/W} = t_k \cdot \frac{1,05 + 1}{2} \quad (Gl. 5-26)$$

$t_{k,O/W}$  ..... Einschaltzeit Ost- Westorientierung

$t_k$  ..... Einschaltzeit Südorientierung nach (Gl. 6-22)

Die Korrekturfaktoren aus Verschattung angrenzender Baukörper werden hier erst einmal vernachlässigt. Dieser Einfluss ist bei weiterführenden Untersuchungen nachträglich zu ergänzen.

Aus den Kunstlichteinschaltzeiten der einzelnen Richtungen wird eine über die Flächen gewichtet mittlere Kunstlichteinschaltzeit berechnet:

$$t_{k,m} = \frac{t_{k,N} \cdot A_N + t_{k,O} \cdot A_O + t_{k,S} \cdot A_S + t_{k,W} \cdot A_W}{A_N + A_O + A_S + A_W} \quad (Gl. 5-27)$$

$t_{k,N}$  ..... Kunstlichteinschaltzeit für Nordrichtung (Index O..Ost, S..Süd, W..West)

$A_N$  ..... Außenwandfläche Nord (Index O..Ost, S..Süd, ..West)

Mit Hilfe der mittleren Kunstlichteinschaltzeit berechnet sich der Jahres-Kunstlicht-Strombedarf allgemein:

$$KSB = \frac{E_{nenn} \cdot b_{str} \cdot t_{str} \cdot (P_{Lampe} + P_{KVG}) \cdot t_{k,m}}{\Phi_{Lampe} \cdot \eta_B \cdot v \cdot 1000} \quad (Gl. 5-28)$$

$E_{nenn}$  ..... Nennbeleuchtungsstärke [Lux]

$b_{str}$  ..... Breite Standardraum [m]

$t_{str}$  ..... Tiefe Standardraum [m]

$P_{Lampe}$  ..... Anschlussleistung Lampe [W]

$P_{KVG}$  ..... Anschlussleistung konventionelles Vorschaltgerät [W]

$t_{k,m}$ .....	mittlere jährliche Kunstlichteinschaltzeit [h/a]
$\Phi_{Lampe}$ .....	Lampenlichtstrom [lm]
$\eta_B$ .....	Beleuchtungswirkungsgrad
$v$ .....	Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung der Verschmutzung und Alterungsercheinungen von Lampen

Zur Vereinfachung der Berechnung wird in [35] eine Standardlampe mit nachfolgenden Eigenschaften vorgeschlagen.

	Formelzeichen	Größe	Einheit
Lichtstrom einer Standardleuchtstoffröhre	$\Phi_{Lampe}$	5400	Lm
Anschlussleistung der Standardlampe	$P_{Lampe}$	58	W
Anschlussleistung Vorschaltgerät	$P_{KVG}$	10	W
Abminderungsfaktor für Beleuchtungswirkungsgrad	$v$	0,8	-

Tabelle 5-7: Eigenschaften Standardlampe

Das Verfahren zur Berechnung des Beleuchtungswirkungsgrads basiert auf folgenden Annahmen der Reflexionsgrade der Raumschließungsflächen (DIN 5034):

- |   |                          |     |
|---|--------------------------|-----|
| 0 | Reflexionsgrad Decke     | 70% |
| 1 | Reflexionsgrad Raumwände | 50% |
| 2 | Reflexionsgrad Boden     | 20% |

Mit den oben angegebenen Werten der Standardlampe vereinfacht sich die Berechnung des Jahres-Kunstlicht-Strombedarfs (Gl. 6-28) zu:

$$KSB = \frac{E_{nenn} \cdot b_{str} \cdot t_{str} \cdot t_{k,m}}{\eta_B} \cdot 1,57 \cdot 10^{-5} \quad (Gl. 5-29)$$

Der Beleuchtungswirkungsgrad ist von der Beleuchtungsstrategie abhängig. Es werden allgemein drei verschiedene Strategien unterschieden:

- Direkte Beleuchtung:  
Die Belichtung erfolgt auf direktem Weg von oben auf die Arbeitsfläche.
- Direkte/indirekte Beleuchtung:  
Die Belichtung erfolgt sowohl über den direkten Weg von oben auf die Arbeitsfläche als auch über den indirekten Weg, über die Reflexion von Decke und Wänden.
- Indirekte Beleuchtung:  
Die Belichtung erfolgt indirekt über die Reflexion von Decke und Wänden.

Als allgemeiner Ansatz wird eine direkte/indirekte Beleuchtungsstrategie ausgewählt, die den größten Wirkungsgrad der drei Strategien aufweist. Genauere Betrachtungsweisen sind im Rahmen dieser Arbeit nicht erforderlich, können aber durch entsprechende Weiterentwicklungen vorgesehen werden.

Für die Berechnung des Beleuchtungswirkungsgrads ist eine Hilfsvariable, der Raumindex erforderlich, der die Geometrie des Raumes beschreibt. Der Raumindex berechnet sich zu

$$k_R = \frac{t_{srt} \cdot b_{str}}{h_r \cdot (t_{srt} + b_{str})} \quad (Gl. 5-30)$$

$h_r$ .....	Höhe der Lampe über der Nutzungsebene
$b_{str}$ .....	Breite Standardraum [m]
$t_{str}$ .....	Tiefe Standardraum [m]

Die Höhe der Lampe über der Nutzungsebene (0,85 m) wird mit 1,15 m so angenommen, dass die Lampe in 2,00 m Höhe im Raum angebracht ist. Mit Hilfe des Raumindex berechnet sich der Beleuchtungswirkungsgrad für die direkte/indirekte Beleuchtungsstrategie [35] zu

$$\eta_B = -0,0018 \cdot k_R^4 + 0,0288 \cdot k_R^3 - 0,1744 \cdot k_R^2 + 0,503 \cdot k_R + 0,0452 \quad (\text{Gl. 5-31})$$

Die jährlichen Kosten für den Jahres-Kunstlicht-Strombedarf berechnen sich aus dem Bedarf mal einem mittleren Strompreis von 0,25 DM/kWh zu:

$$EK_{KSB} = 0,25 \cdot KSB \quad (\text{Gl. 5-32})$$

0,25 .....mittlerer Strompreis [DM/kWh]

$EK_{KSB}$  .....Jahres-Kunstlicht-Strombedarf [DM/a]

Der bewertete Energiebedarf unter Berücksichtigung des Primärenergieinhalts der eingesetzten Energieträger beträgt für den Jahres-Kunstlicht-Strombedarf:

$$EB_{KSB} = 3,22 \cdot KSB \quad (\text{Gl. 5-33})$$

$EB_{KSB}$  .....bewerteter Jahres-Kunstlicht-Strombedarf [kWh/a]

3,22 .....primärenergetischer Bewertungsfaktor nach [35].

### 5.3 Flexibilität

Die Flexibilität eines Büromoduls gibt eine Auskunft über mögliche Raumaufteilungen und Raumnutzungen innerhalb eines Bürogeschosses. Es ist klar, dass die Flexibilität eines Geschosses sehr groß ist, wenn eine freie Raumaufteilung ohne Zwangs- bzw. Randbedingungen möglich sind. Bei Geschossen, die viele feste und tragende Wände aufweisen, ist fast keine flexible Neuordnung der Räume bzw. des Geschosses gegeben.

Bei Skelettbauten beschränken sich diese Aussagen der Flexibilität im wesentlichen auf die verschiedenen Möglichkeiten, Trennwände zu errichten und damit verschiedene Räume und Raumaufteilungen zu definieren. Dabei wird der Grad der Abhängigkeit von anderen Entwurfsparametern als Beurteilungshilfe verwendet. Um die Flexibilität eines Büromoduls beurteilen und fassen zu können, wird ein einfaches, vergleichendes Bewertungssystem eingeführt. Es wird eine Rangordnung definiert, die aus drei einfachen Rängen besteht:

- hohe Flexibilität,
- mittlere Flexibilität und
- geringe Flexibilität.

Für die Anwendung dieses Kriteriums im Zusammenhang mit der Entwurfsoptimierung werden den einzelnen Rängen Zahlenwerte zugeordnet.

Hohe Flexibilität	mittlere Flexibilität	Geringe Flexibilität
2	1	0

Aus den verschiedenen Einzelparametern und den zugehörigen Flexibilität wird über ein additives Modell eine Gesamtflexibilität berechnet. Als Optimierungsziel wird die Maximierung der Flexibilitätsumme definiert.

$$SumFlexi = \sum_{i=1}^n Flexi_i \quad (\text{Gl. 5-34})$$

Folgende Entwurfsvariablen haben einen Einfluss auf die Flexibilität eines Büromoduls:

- Deckenkonstruktion
- Stützenstellung (Anzahl der Stützachsen)
- Stellung der Außenstütze
- Stellung der Innenstütze
- Rasterart
- Trennwandsystem.

Die für die Berechnung der Flexibilität verwendeten Zahlenwerte sind in Tabellen im Anhang 4 zusammengestellt.

– *Deckenkonstruktion*

Die Deckenkonstruktion beeinflusst die Flexibilität über die Lage vorhandener Unterzüge. Bei einer Flachdecke ist die Flexibilität am größten, da keine Unterzüge die Anordnung von Trennwänden erschweren. Eine mittlere Flexibilität erreicht man mit der Anordnung von Unterzügen parallel zur Fassade. Wird bei Kombibüros der Unterzug an der Fassade als Brüstungsüberzug ausgeführt und ist die mittlere Konstruktionsachse vor der Bürotrennwand angeordnet, dann können im Bereich der Einzelbüros entlang der Fassade die Trennwände problemlos versetzt bzw. angeordnet werden. Lediglich bei einer Änderung der Bürostruktur ergeben sich schwierigere Detailpunkte an den mittleren Unterzügen. Werden nun die Unterzüge in Gebäudequerrichtung angeordnet, dann sind verschiedene Trennwandelemente zu planen, nämlich Elemente, die parallel unterhalb der Unterzüge angeordnet sind, und Elemente, die quer zu den Unterzügen verlaufen.

– *Stützenstellung (Anzahl der Stützachsen)*

Die Anzahl der Stützachsen hat ebenfalls einen Einfluss auf die Flexibilität eines Geschossmoduls. Es ist klar, dass bei einem stützenfreien Innenraum die Flexibilität am größten ist, während bei zwei innenliegenden Stützen die Flexibilität am geringsten ist.

Da bei einer Anordnung von zwei Innenstützen infolge der möglichen Stützenstellungen eine weitere Beurteilung der Flexibilität vorgenommen wird, werden die Zahlenwerte der Beurteilung hier verdoppelt. Das bedeutet, dass die maximale Flexibilität einer dreifeldigen Konstruktion infolge günstiger Stellung der Innenstütze gleich 2 ist. Somit ist eine klare Reihenfolge definiert.

– *Stellung der Außenstütze*

Steht die Außenstütze vor der Fassade, dann kann die Trennwand unproblematisch an jedem Fassadenpfosten angeschlossen werden. Bei Anordnung der Stütze im Innenraum können Sonderteile der Trennwände notwendig werden. Darüber hinaus nimmt die Stütze einen Teil der Geschossfläche ein, der nicht genutzt werden kann. Bei ungünstiger Stützenstellung ist der Flächenverbrauch im Bereich der Stütze größer als der eigentliche Stützquerschnitt.

– *Stellung der Innenstütze*

Dieses Kriterium wird nur aktiv, wenn eine dreifeldige Konstruktion vorliegt. Wie bei der Außenstütze beeinflusst die Stellung der Innenstütze die Flexibilität der Geschossfläche. Die größte Flexibilität wird erreicht, wenn die Stützen nicht in der Bürozone stehen und wenn die Trennwandsysteme unabhängig von den Stützen sind.

– *Rasterart*

Bei getrenntem Konstruktions- und Ausbauraster ist es klar, dass die Stützen die Anordnung der Trennwände nicht wesentlich stören. Es kann jedoch zu ungünstigem Flächenverbrauch kommen, was bei der Beurteilung der Flexibilität über die oben beschriebenen Parameter gesteuert werden kann. Bei deckungsgleichem Konstruktions- und Ausbauraster werden immer



Sonderteile der Trennwand benötigt. Aus diesen Gründen wird der nachfolgende Bewertungsansatz gewählt.

– *Trennwandsystem*

Das Trennwandsystem hat ebenfalls einen Einfluss auf die Flexibilität des Geschosses. Plant man beispielsweise ein flexibles Trennwandsystem mit elementierten Trennwänden, dann kann man eine sehr hohe Flexibilität des Geschosses erreichen. Die Auswirkung und Beeinflussung auf den gesamten Entwurf wird an anderer Stelle diskutiert. Demgegenüber ist bei gemauerten Trennwänden nur eine sehr geringe Flexibilität vorhanden.

Da es trotz der vielen Abhängigkeiten Lösungen gleicher Flexibilität, aber mit unterschiedlichen Variablen gibt, ist das Flexibilitätskriterium nur im Zusammenhang mit anderen Optimierungskriterien sinnvoll. An dieser Stelle sei auf die Vergleichsberechnung in Kapitel 9 hingewiesen.

## 5.4 Geometrieparameter

Zur Beurteilung eines Gebäudeentwurfs können sehr viele Geometrieparameter berechnet und miteinander verglichen werden. In der Praxis haben sich der Bruttorauminhalt (BRI) und die Bruttogeschossfläche (BGF) als wesentliche geometrische Größen bewährt. Eine größere Verbreitung haben jedoch auf Kosten bezogene Geometrieparameter. So sind die Kosten pro m<sup>3</sup> Bruttorauminhalt bzw. Kosten pro m<sup>2</sup> Bruttogeschossfläche ein gängiges Maß, um schnell Gebäudeentwürfe zu kontrollieren. Bei Untersuchungen mit vorgegebenem Raumprogramm und Flächen spielt die BGF für die Optimierung keine große Rolle mehr. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit der Bruttorauminhalt als Optimierungsvariable verwendet.

Im Zusammenhang mit den geometrischen Kriterien sei noch auf ein weiteres Optimierungskriterium hingewiesen. Bei innerstädtischen Bauwerken ist die Bauhöhe ein sehr wichtiges Kriterium. Meistens ist bei solchen Aufgabenstellungen eine maximale Bauhöhe vorgegeben. Die Anforderung nach einer möglichst großen Nutzfläche unter Berücksichtigung der maximalen Bauhöhe ist für solche Projekte ein wesentliches Optimierungskriterium.

## 5.5 Investitionsanalyse

Zusätzlich zu der Berechnung der Herstellkosten und der Nutzungskosten wird eine Investitionsanalyse für die Beurteilung verschiedenen Entwurfsalternativen notwendig. Durch solch eine Analyse können verschiedenen Entwurfsvarianten in Abhängigkeit der Zeit untersucht und beurteilt werden. Aus der Betriebswirtschaftslehre sind verschiedene Verfahren zur Investitionsberechnung bekannt. Im Zusammenhang dieser Arbeit wird die sogenannte Kapitalwertmethode verwendet. Bei dieser Methode wird auf der Basis der jährlichen Einnahmen und Ausgaben, der Investitionskosten, des Restwertes und eines kalkulatorischen Zinssatzes der Geldwert für einen bestimmten Zeitpunkt ermittelt. In allgemeiner Form berechnet sich der Kapitalwert einer Investition zu

$$K_0 = \sum_{i=1}^n E_i \cdot q^{-i} - \sum_{i=1}^n A_i \cdot q^{-i} - I + R \cdot q^n \quad (\text{Gl. 5-35})$$

$K_0$  ..... Kapitalwert  
 $E_i$  ..... Einnahmen im  $i$ -ten Jahr  
 $A_i$  ..... Ausgaben im  $i$ -ten Jahr  
 $I$  ..... Investitionskosten  
 $R$  ..... Restwert der Investition nach  $n$  Jahren  
 $p$  ..... kalkulatorischer Zinssatz  
 $q$  ..... Zinsfaktor nach (Gl. 5-3).

Der kalkulatorische Zinssatz berechnet sich aus dem Anteil des Eigenkapitals, multipliziert mit der Verzinsung des Eigenkapitals, und dem Anteil an Fremdkapital multipliziert mit dem Fremdkapitalzins.

$$p = A_{\text{eigen}} \cdot p_{\text{eigen}} + A_{\text{Femd}} \cdot p_{\text{Fremd}} \quad (\text{Gl. 5-36})$$

$A_{\text{Eigen}}$ ..... Anteil Eigenkapital in [%]  
 $p_{\text{Eigen}}$ ..... Verzinsung Eigenkapital  
 $A_{\text{Fremd}}$ ..... Anteil Fremdkapital in [%]  
 $p_{\text{Fremd}}$ ..... Verzinsung Fremdkapital.

Ein erster Ansatz zur Investitionsanalyse wird auf der Basis der oben beschriebenen Kapitalwertmethode durchgeführt. Es wird vereinfachend auf die Bestimmung des Restwertes verzichtet und es werden nur die jährlichen Ausgaben, die Baunutzungskosten, berücksichtigt. Der Kapitalwert wird jährlich für einen Zeitraum von 25 Jahren nach Erstellung des Gebäudes berechnet. Die entsprechenden Ergebnisse werden in einer Grafik dargestellt.

Der Einfluss der Bauzeit wird noch nicht berücksichtigt, kann aber durch weitergehende Untersuchungen nachträglich ergänzt werden.

## 5.6 Energiebedarf

Im Zusammenhang mit der Diskussion um die Wärmeschutzverordnung steht u. a. die Minimierung des Energieverbrauchs durch Heizung, Lüftung, Kühlung und Stromversorgung im Vordergrund. Dies sind in der Tat wichtige Aspekte, jedoch ist die Frage des energiesparenden Bauens viel komplexer. Bei einer ganzheitlichen Betrachtungsweise kann das Thema "Energiesparendes Bauen" in drei Teilgebiete aufgeteilt werden:

- Energiebedarf zur Herstellung des Gebäudes
- Energiebedarf zum Betrieb des Gebäudes (Heizung, Lüftung, Belichtung etc.)
- Energiebedarf zum Abriss bzw. zum Recyceln des Bauwerks

Die oben beschriebenen Themen sind sehr komplex und können im Rahmen dieser Arbeit nicht erschöpfend untersucht werden. Es soll hier jedoch im Zusammenhang mit einer ganzheitlichen Betrachtungsweise ein Bewertungsansatz vorgestellt werden. Dieser Ansatz ist im Modell noch sehr einfach gehalten. Es besteht aber die Möglichkeit, diesen Ansatz nach weitergehenden Forschungen und Entwicklungen durch ein entsprechendes erweitertes Programmmodul zu ersetzen.

Der Energiebedarf zum Betrieb des Gebäudes ist bereits in den Betriebskosten berücksichtigt. Der hier vorgestellte Bewertungsansatz beschränkt sich auf die Betrachtung des Primärenergiebedarfs zur Herstellung eines Gebäudes.

Dieser setzt sich zusammen aus:

- Energiebedarf zur Herstellung der Baumaterialien,
- Energiebedarf beim Transport der Baumaterialien,
- Energiebedarf beim Einbau der Baumaterialien,
- Energiebedarf zur Herstellung der Bauteile und dem
- Energiebedarf für Sonstiges.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein einfacher Ansatz zur Berechnung des Primärenergiebedarfs auf der Basis der wichtigsten Baustoffe wie Beton, Bewehrungsstahl (Matten und Stabstahl), Profilstahl und Trapezblech vorgeschlagen.

Die entsprechenden Berechnungsansätze sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt.

Baustoff	Dichte [t/m <sup>3</sup> ]	Einheit	Primärenergiegehalt
Beton	2,4	kWh/m <sup>3</sup>	470,00
Betonstahl (Stabstahl, Mattenstahl)	7,8	kWh/t	8350,00
Profilstahl	7,8	kWh/t	7190,00
Stahlblech	7,8	kWh/t	9210,00

*Tabelle 5-8: Primärenergiegehalt Baustoffe [69]*

Dieser Ansatz soll nur als Denkanstoß für ein Beurteilungskriterium dienen, wird hier jedoch nicht weiter ausgeführt und auch für Vergleichsberechnungen nicht verwendet.

## 5.7 Entwicklung von Optimierungskriterien

Für die Entwurfsoptimierung werden basierend auf den obigen Ausführungen nachfolgende Optimierungskriterien definiert:

- minimale Herstellkosten
- minimale Rohbaukosten
- minimale Baunutzungskosten
- minimaler BRI
- minimaler Primärenergiebedarf
- maximale Flexibilität
- $h_{GM} < \text{vorgegebene Höhe und maximale BGF}$
- $h_{GM} < \text{vorgegebene Höhe und maximale nzi}$

Zusätzlich zu den Einzelkriterien sind verschiedene Kriterienkombinationen definierbar. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Kosten und die Geometrie eines Gebäudes die wichtigsten Kriterien zur Beurteilung darstellen.

## 6 Softwareentwicklung

### 6.1 Allgemeines

Im Rahmen dieser Arbeit wurde für alle notwendigen Untersuchungen und Vergleichsberechnungen eine eigene Software entwickelt. Dies war aus folgenden Gründen notwendig:

- Um eine ganzheitliche Entwurfsbeurteilung durchzuführen, müssen viele verschiedene Informationen ermittelt werden. Damit alle maßgebenden Parameter mit allen Verknüpfungen und Abhängigkeiten und den daraus resultierenden Datenmengen berücksichtigt werden können, ist ein rechnergestütztes System erforderlich.
- Es existiert keine geeignete Software, mit der man zumindest einen Teil einer Gebäudegeometrie numerisch modellieren und bearbeiten kann.
- Ein allgemein verbreitetes Konzept der Statiksoftware besteht aus den üblichen Nachweisverfahren, bei denen ein Querschnitt vorgegeben werden muss, an dem die erforderlichen Nachweise geführt werden. Sind diese nicht erfüllt, muss der Querschnitt geändert und die Berechnung wiederholt werden. Diese Art der Berechnung ist nicht automatisierbar. Aus diesem Grund ist es erforderlich, dass die einzelnen Berechnungsmodule über eine eigene "Intelligenz" verfügen, d. h. dass die Berechnung selbsttätig nach gewissen Regeln aus der gegebenen Geometrie und den gegebenen Lasten einen Bauteilquerschnitt ermittelt, für den alle erforderlichen Nachweise erfüllt sind.
- Für eine durchgängige statische Berechnung ist es erforderlich, dass eine sogenannte Lastverfolgung stattfinden kann, bei der die Ergebnisse einer Position als Belastung an eine weitere Position übergeben werden können.
- Die existierende Berechnungssoftware, die in umfangreichen Softwarepaketen auf dem Markt angeboten wird, ist nicht in allen Materialnachweisen gleich gut. Die meisten Softwarepakete sind für den Massivbau ausgelegt.
- Es ist ein einfaches, klar strukturiertes und durchgängiges Softwarekonzept notwendig, um ohne komplizierte Schnittstellen zu anderen Programmen und mit geringem Speicherbedarf eine hohe Berechnungsgeschwindigkeit zu erzielen.

Das Programm OPS (Office Planing System) wurde mit Hilfe der Entwicklungssoftware Borland Delphi (Version 3.0) in PASCAL geschrieben.

Im folgenden Kapitel werden die wesentlichen Ansätze und Überlegungen dargelegt, die bei der Entwicklung der Software im Rahmen dieser Arbeit verwendet wurden.

### 6.2 Allgemeine Programmstruktur

Das Programm ist modular aufgebaut und besteht aus einem Hauptprogramm und verschiedenen Programmmodulen. Der Vorteil dieses modularen Aufbaus liegt darin, dass die einzelnen Module problemlos geändert bzw. durch neue Module ersetzt werden können. Auch können Module eingesetzt werden, die in einer anderen Programmiersprache geschrieben sind. Das Programm ist wie ein Standard Windows Programm organisiert. Über eine Menuleiste werden alle Programmabläufe gesteuert. Darüber hinaus können alle Eingaben durch Mausklick vorgenommen werden. Alle Felder sind mit einer Hilfefunktion ausgestattet, die die Funktionsweise bzw. die Zuordnung für jedes Feld erklärt.

Die Programmoberfläche gliedert sich in vier verschiedene, hintereinander liegende Registerkarten. Diese Registerkarten sind Eingabeseite, Einzelberechnung, Optimierung und Auswertung. Auf der Eingabeseite werden die in Kapitel 5 als feste Parameter bezeichneten Variablen eingegeben. Diese Variablen sind für alle Berechnungen gültig.

Die Registerkarte Einzelberechnung gliedert sich in drei weitere Registerseiten. Es werden zwei Seiten für die Eingabe der freien Variablen verwendet. Die dritte Seite ist als Ausgabeseite aufgebaut. Dort werden die Berechnungsergebnisse und eine Grundrissgrafik abgebildet.

Die Registerkarte Optimierung gliedert sich ebenfalls in drei Registerseiten. Zum einen werden die Steuerparameter der Optimierung und zum anderen die Optimierungskriterien sowie die Gewichtung der Kriterien eingegeben. Gleichzeitig werden auf dieser Seite der Fortschritt der Optimierung als Diagramm und eine Grundrissgrafik des momentan besten Individuums angezeigt. Auf der zweiten Seite werden die Berechnungsergebnisse des gefundenen Optimums ausgegeben. Auf der dritten Seite werden die Variablen und Kriterien einzelner Optimierungsberechnungen aufgelistet.

In der Registerkarte Auswertung werden die Ergebnisse nacheinander durchgeführter Berechnungen in Balkendiagrammen dargestellt. Es besteht hier eine einfache Möglichkeit, mehrere Berechnungen direkt miteinander zu vergleichen. Die Funktionsweise der Software wird nun im folgenden Kapitel beschrieben.

### 6.2.1 Funktionsweise Programm

Die Funktionsweise der Software basiert auf folgenden prinzipiellen Ansätzen:

- Es stehen zwei Berechnungsmethoden zur Verfügung. Zum einen kann auf der Basis der festen Eingabevariablen eine Optimierung nach vorgegebenen Kriterien durchgeführt werden. Zum anderen können die "freien Variablen" manuell eingegeben und eine Einzelrechnung durchgeführt werden. Der Vorteil dieser Aufteilung in zwei Berechnungsarten wird durch die nachfolgenden Ansätze deutlich.
- Nach Beendigung einer Optimierung besteht die Möglichkeit, die Ergebnisdaten als Eingabedaten für eine Einzelberechnung zu transferieren. Der Vorteil dieser Verknüpfung liegt in der Möglichkeit, einzelne Variablen zu verändern und die Auswirkung direkt mit dem Ergebnis der Optimierung zu vergleichen. Ein weiterer Vorteil liegt in der möglichen Feinjustierung der Variablenwerte. Wie im Kapitel 3 erläutert, hat der verwendete genetische Algorithmus Schwierigkeiten bei der Feinabstimmung reeller Variablen. Diese Feinabstimmung kann durch manuelle Veränderung der Variablen vorgenommen werden.
- Es wird die Möglichkeit gegeben, die Optimierung zu unterbrechen. Eine solche Unterbrechung ermöglicht die Veränderung der Steuerparameter für den Algorithmus. Dadurch kann die Konvergenzgeschwindigkeit beeinflusst werden. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit die Anzahl der Variablen im Optimierungsablauf zu verändern. Das bedeutet, dass z. B. eine Variable einen Wert angenommen hat, der nicht mehr verändert werden soll. In diesem Fall wird die Variable aus der Menge der freien Variablen herausgelöst und mit dem letzten Wert beim Fortgang der Berechnung berücksichtigt.
- Neben der Möglichkeit einer Unterbrechung kann die Anzahl der Variablen vor einer Optimierung verändert werden. So kann beispielsweise die Variable "Bauweise" vorgegeben werden. Das heißt, dass die Bauweise während der weiteren Optimierung nicht verändert wird und den vorgegebenen Wert beibehält.
- Die für die Bewertung der einzelnen Individuen notwendigen Kosten- und Bauwerksdaten sind in Datenbanken gespeichert. Somit können die Kostendaten leicht verändert werden und die Bauwerksdaten können sowohl verändert als auch ergänzt werden.

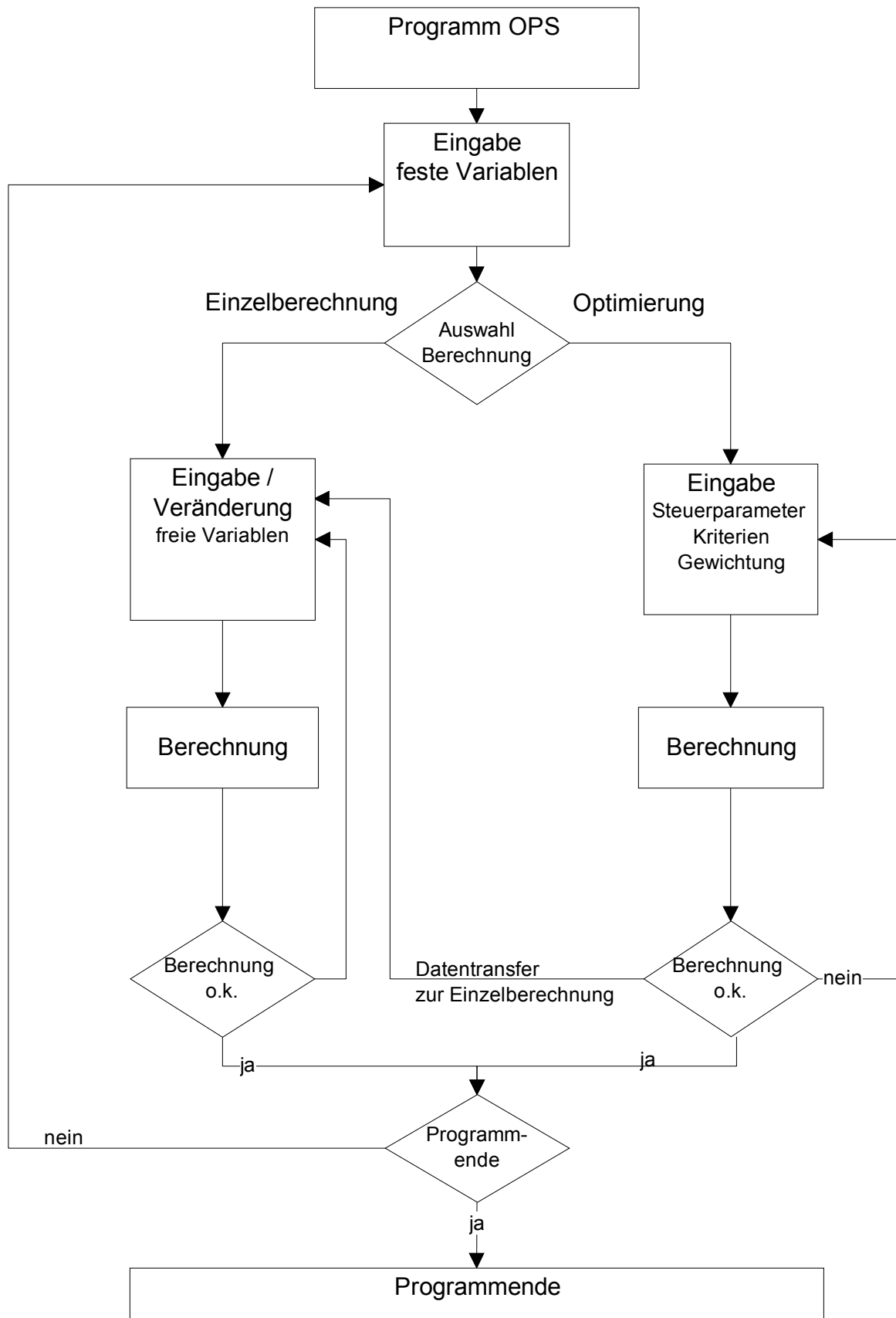


Abbildung 6-1: Funktionsdiagramm Programm OPS

### 6.2.2 *Verschiedene Anwendungsmöglichkeiten*

Der Aufbau des Programms ist allgemeingültig zu verstehen. Die Funktionsweise ist auf verschiedene andere Aufgaben übertragbar. So sind neben den Bürogebäuden andere Entwurfsaufgaben, die wie die Bürogebäude aus größeren Grundmodulen bestehen, mit dem gleichen Funktionsprinzip lösbar. Es müsste lediglich die entsprechenden Programmmodule, im wesentlichen sind das der Geometrie- und der Berechnungsmodul, verändert werden. Folgende Entwurfsaufgaben können in Teilen mit dem hier vorgestellten Funktionsprinzip optimiert bzw. ganzheitlich untersucht werden:

- Universitätsbauten
- Schulen
- Krankenhäuser
- Altenwohnheime
- Einfache Produktionshallen.

Diese verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten zeigen, dass durch geringfügige Änderungen einzelner Programmmodule, unter Beibehaltung des grundlegenden Programmprinzips, der hier vorgestellte Lösungsansatz einer ganzheitlichen Entwurfsoptimierung und –bewertung allgemeingültig verwendet werden kann.

## 6.3 **Beschreibung der Einzelmodule**

### 6.3.1 *Geometriemodul*

In diesem Modul wird die Geometrie von Bürogebäuden berechnet. Die Geometrie bezieht sich hierbei auf das Grundmodul, wie es in Kapitel 4 beschrieben ist. Die wesentlichen geometrischen Größen sind:

- Breite Standardbüro
- Tiefe Standardbüro
- Gebäudebreite
- Gebäudelänge
- Konstruktionsraster, Stellung der Außen- und Innenstützen.

Die Geschosshöhe als weiterer wichtiger Geometrieparameter ist von der Deckenkonstruktion abhängig und wird nach deren Bemessung berechnet.

Es werden bei der Geometrieberechnung alle wichtigen äußeren Einflüsse berücksichtigt. Die Anordnung einer Tiefgarage hat gravierende Auswirkungen auf das Konstruktionsraster des Grundmoduls. Diese Einflüsse sind ebenfalls im Geometriemodul berücksichtigt.

Bei einer Änderung des Anwendungsgebietes ist die Berechnung der Geometrie der neuen Aufgabenstellung anzupassen bzw. neu zu erstellen.

### 6.3.2 *Berechnungsmodule*

Die allgemeine Berechnung wird in Abhängigkeit der verschiedenen Deckenkonstruktionen und Bauweisen in fünf prinzipielle Systeme eingeteilt (siehe Tabelle 4-5), die zusätzliche alle möglichen Stützenstellungen berücksichtigen. Für jedes dieser Systeme werden die einzelnen Berechnungspositionen, die Berechnungsreihenfolge und die Weiterleitung der Lasten und Ergebnisse formuliert. Diese Aufteilung in einzelne Berechnungssysteme ist hier für das in Kapitel 4 beschriebene Grundmodul durchgeführt. Bei anderen Aufgabenstellungen muss diese Systematik neu entwickelt werden. Trotz dieser auf die Entwurfsaufgabe abgestimmten individuellen Berechnungssysteme werden standardisierte Berechnungsmodule zur Berechnung der einzelnen Tragelemente entwickelt, auf die unterschiedlichen Systeme zugreifen. Durch diese

Modularität sind Änderungen der Entwurfsaufgabe und somit eine Änderung der Software einfach durchzuführen. Die einzelnen Berechnungsmodule sind:

- StB-Flachdecke
- StB-Decke
- Verbunddecke
- StB-Träger
- Verbundträger
- StB-Stütze
- Verbundstütze
- Giebelwand
- Kellerwand
- Bodenplatte
- Fundamente
- Erdarbeiten.

Bei der Entwicklung der einzelnen Berechnungsmodule wurden die aktuellen europäischen Normen, EC 2 (Massivbau) und EC 4 (Verbundbau) verwendet. Auf eine detaillierte Ausführung der einzelnen Berechnungsmodule wird hier verzichtet, da diese alle den aktuellen Normen entsprechen und durch Vergleichsberechnung sowohl von Hand als auch durch andere Softwareprogramme überprüft wurden. Es sollen hier lediglich die getroffenen Annahmen und die Bemessungsansätze vorgestellt werden.

#### 6.3.2.1 StB-Flachdecke

Die Berechnung der StB-Flachdecke wird nach dem im Heft 240 DAfStB von E.Grasser und G.Thielen [90] vorgestellten Näherungsverfahren durchgeführt. Weiterhin beschränkt sich die Berechnung nur auf die Ermittlung der erforderlichen Biegebemessung. Ein Durchstanznachweis wird nicht geführt. Durchstanzprobleme sind mit einer Anordnung von Dübelleisten oder durch Anordnung einer Stützenkopfverstärkung lösbar.

Die Plattendicke wird über die erforderliche Biegeschlankheit ermittelt. Hierbei wird eine mittlere Beanspruchung des Betons angenommen. Die Betondeckung wird mit  $nom\ c=2,5\ cm$  und der durchschnittliche Durchmesser der Längsbewehrung zu  $d=1,2\ cm$  angenommen. Nach EC 2 berechnet sich die erforderliche Dicke der Platte zu:

$$erfh_p = \frac{l_{eff} \cdot 100}{28} + 2,5 + \frac{1,2}{2} \quad (Gl. 6-1)$$

Es wird ein Grundwert der Biegeschlankheit gewählt, der zwischen den Grenzwerten nach EC 2, Tabelle 4.14 liegt.

Der minimale Plattendicke wird aus Brandschutzgründen mit  $h_{p,min} = 20\ cm$  festgelegt.

#### 6.3.2.2 StB-Decke

Im Gegensatz zur zweiachsig gespannten Flachdecke wird die normale StB-Decke als einachsig gespannte Decke, die auf Unterzügen gelagert ist, ausgeführt. Ähnlich wie bei der Flachdecke wird die Dicke der einachsig gespannten StB-Decke über die zulässige Biegeschlankheit nach EC 2 berechnet. Hier wird nach Tabelle 4.14, Zeile 2, Spalte Beton gering beansprucht der Grundwert zu 32 festgelegt. Es wird eine Schrittweite von 2 cm bei der Berechnung der Deckendicke angenommen. In Abhängigkeit der effektiven Spannweite ergeben sich folgende Deckendicken:



Effektive Spannweite	Deckendicke
< 4,20 m	16 cm
< 4,84 m	18 cm
< 5,48 m	20 cm
< 6,12 m	22 cm
< 6,76 m	24 cm
< 7,40 m	26 cm
< 8,04 m	28 cm
< 8,68 m	30 cm
< 9,33 m	32 cm

*Tabelle 6-1: Deckendicke in Abhängigkeit der effektiven Spannweite*

Die effektive Spannweite ist in der Regel definiert als die Spannweite zwischen den Momentennullpunkten. Bei Durchlaufträgern ist immer das Endfeld maßgebend, bei dem die effektive Spannweite ungefähr 80% der tatsächlichen Spannweite beträgt. Für die hier durchgeführten Berechnungen wird ein Ansatz gewählt, bei dem die effektive Spannweite gleich der tatsächlichen Spannweite gesetzt und die Deckendicke aus der maximalen Spannweite berechnet wird. Dieser Ansatz führt zu geringfügig dickeren Decken, hat aber den Vorteil, dass auf eine Unterscheidung von Außen- und Innenfeld, der daraus resultierenden effektiven Spannweite und der Ermittlung der für die Deckendicke maßgebenden maximalen effektiven Spannweite verzichtet werden kann. Diese Verringerung der Abhängigkeiten und Verknüpfungen führt bei einer Entwurfsoptimierung mit sehr vielen einzelnen Berechnungen zu einer Erhöhung der Rechengeschwindigkeit.

Die Bemessung der Decke erfolgt nach den üblichen Bemessungsverfahren des EC 2.

#### 6.3.2.3 Verbunddecke

Obwohl mehrere Verbunddeckensysteme bauaufsichtlich zugelassen sind, wird in diesem Modul eine Verbunddecke aus HOLORIB HR 51 Trapezblechen verwendet. Vereinfachend werden nur Bleche mit einer Blechdicke von 1,00 mm betrachtet. Die Nachweise werden entsprechend EC 4 geführt. Im Brandfall erfolgt eine vereinfachte Bemessung auf der Basis des Brandschutzgutachtens [34]. Die Mindestdicke des Aufbetons wird sowohl über eine Durchbiegungsbeschränkung nach EC 2, Kapitel 4.4.3.2, über die Mindestdicke nach EC 4, Kapitel 7.2.1 und nach den Brandschutzanforderungen [34] berechnet.

Für die Berechnung der Verbunddecke werden nach EC 4 folgende zusätzliche Annahmen getroffen:

- Verbunddurchlaufplatten dürfen nach EC 4 Kapitel 7.4.2.1 (4) als eine Kette von Einfeldträgern berechnet werden.
- Diese Annahme fordert eine zusätzliche konstruktive Stützbewehrung. Bei Platten ohne Betonierstützen sind 0,2%, sonst 0,4% der Betonquerschnittsfläche oberhalb des Profilbleches als Stützbewehrung einzubauen.
- Die Bleche werden feldweise eingebaut und mit Blechverformungsankern versehen.
- Die Bemessung wird mit Hilfe eines vereinfachten Nachweisverfahrens nach [9] durchgeführt. Dabei dürfen die vorhandenen Bemessungsmomente an keiner Stelle die maximal aufnehmbaren Momente aus Biegetragfähigkeit und Längsschubtragfähigkeit überschreiten. Zusätzlich muss die vorhandene Querkraft immer kleiner sein als die aufnehmbare Querkraft. Die Bemessung erfolgt über die Variation der Deckendicke, die so lange vergrößert wird, bis diese Bedingungen erfüllt sind.

- Bei größeren Spannweiten sind Verbunddecken nicht mehr sinnvoll, da der Stahlquerschnitt des Trapezbleches nicht mehr als Bewehrung ausreicht und eine Zulagebewehrung erforderlich wird. Da ein Vorteil der Verbunddecken darin liegt, dass das Trapezblech als erforderliche Feldbewehrung dient und in der Regel keine zusätzliche Bewehrung notwendig ist, werden bei der Berechnung von Verbunddecken nur Spannweiten bis 6,0 m zugelassen.

#### 6.3.2.4 StB-Träger

Die Berechnung der Stahlbetonträger erfolgt nach EC 2 und nach folgenden Annahmen:

- Die StB-Träger werden als Rechteckquerschnitt berechnet, wobei die Oberkante des Trägers mit der Oberkante der Deckenplatte übereinstimmt.
- Die maximale Stabanzahl wird auf 2-Lagen Längsbewehrung festgelegt. Die maximale Anzahl der Stäbe nebeneinander ist von der Balkenbreite, der Betondeckung und dem angenommenen Bügeldurchmesser ( $\varnothing$  10 mm) abhängig.
- Bei der Ermittlung der Längsbewehrung wird 2/3 der Feldbewehrung bis über das Auflager geführt.
- Die Länge der Stützbewehrung wird in Abhängigkeit der Momentennullpunkte aus den zugehörigen Schnittgrößen berechnet.
- Die Schubbewehrung wird je Feld in drei Bereiche (Stütze links – Feldmitte – Stütze rechts) eingeteilt und entsprechend bewehrt.
- In Anlehnung an [91] werden für den Brandschutz mindestens 4 Längseisen der Feldbewehrung bis in die Auflager geführt. Ebenso wird die Stützbewehrung über das übliche Maß hinaus verlängert und  $0,2 \cdot a_{s, \text{Stütz}}$  wird durchlaufend angeordnet.

#### 6.3.2.5 Verbundträger

Die Bemessung erfolgt hier für den Bau- und Endzustand nach EC 4. Im Brandfall wird ein vereinfachtes Bemessungsverfahren nach [17] verwendet.

Für die Berechnung der Verbundträger werden folgende Annahmen getroffen:

- Die Effizienz eines Verbundträgers liegt darin, dass die beiden Werkstoffe Stahl und Beton entsprechend ihren besten Eigenschaften eingesetzt werden. Das bedeutet, dass der Beton für die Abtragung von Druckkräften und der Stahl für die Abtragung von Zugkräften eingesetzt wird. Bei Ausführung eines Verbundträgers als Einfeldträger ist diese Voraussetzung erfüllt. Bei Verbunddurchlaufträgern werden die Vorteile des werkstoffgerechten Materialeinsatzes nicht genutzt, da sich die Kräfte an den Stützmomenten umdrehen und dort zusätzliche Stabilitätsprobleme entstehen. Aus diesen Gründen erscheint es sinnvoll, die Verbundträger nur als Einfeldträger zu verwenden.
- Die Bemessung erfolgt für den Bau-, Endzustand und für den Brandfall.
- Da der Stahlträger im Bauzustand das gesamte Gewicht der Deckenkonstruktion und des flüssigen Betons tragen muss, kann es bei größeren Spannweiten dazu kommen, dass dieser Lastfall maßgebend für die Bemessung wird. Aus diesem Grund wird eine Option zur Verwendung einer Montageunterstützung vorgesehen.
- In Abhängigkeit der Deckenkonstruktion wird der Verbundträger mit/ohne HOLORIB-Decke berechnet.
- Für die Bemessung werden die standardisierten Profile IPE, HEA, HEB und HEM verwendet. Sonderprofile, z. B. von der Firma Spannverbund, werden hier nicht berücksichtigt. Diese Profile können aber problemlos nachträglich in die Software integriert werden. Die Bemessung erfolgt nach zwei unterschiedlichen Prinzipien. Zum einen wird das Profil mit der geringsten Profilhöhe, zum anderen das Profil mit der geringsten Querschnittsfläche ausgewählt.

- Da die Gültigkeit des brandschutztechnischen Berechnungsverfahrens auf Querschnitte mit  $b \geq 150$  mm,  $b < 500$  mm,  $h \geq 300$  mm,  $t_u \geq 8$  mm beschränkt ist, werden nur Profile zugelassen, die diese Anforderungen erfüllen.

#### 6.3.2.6 StB-Stütze

Die Berechnung der Stahlbetonstütze erfolgt gemäß EC 2. Hierbei wird in Abhängigkeit der Stützhöhe und der Breite entschieden, ob eine direkte Bemessung oder eine Bemessung nach dem Modellstützenverfahren erfolgt. Die allgemeine Bemessung für Rechteck- und Rundstützen erfolgt nach dem Gleichgewichtsprinzip. Es werden hierfür Dehnungsverteilungen im Querschnitt angenommen, welche durch die Variation der Stahl- bzw. der Betondehnung verändert werden. Die daraus resultierenden Kräfte werden ins Gleichgewicht gesetzt und eine erforderliche Stahlmenge für Normalkraft- und Momentengleichgewicht berechnet. Es ist dann eine Lösung gefunden, wenn die erforderliche Bewehrungsmenge aus beiden Gleichgewichtsbedingungen übereinstimmt oder eine gewisse vorgegebene Abweichung nicht überschreitet. In [53] wird dieses Bemessungsverfahren für die Anwendung auf Rechenanlagen nach DIN 1045 vorgestellt. Auf dieser Basis, an den Eurocode 2 angepasst, ist das Berechnungsmodul für Stahlbetonstützen umgesetzt.

Zur Beschleunigung des Iterationsprozesses wird eine Anpassung der Schrittweite vorgenommen. Anschaulich kann man sich den Iterationsprozess so vorstellen, dass die erforderlichen Bewehrungsmengen als zwei Kurven mit unterschiedlicher Steigung dargestellt werden können. Der Schnittpunkt dieser Kurven stellt das Ergebnis dar. Wird nun bei einer Iteration dieser Schnittpunkt übersprungen, so wird die Berechnung auf den letzten Schritt zurückgesetzt und mit einer kleineren Schrittweite wieder fortgesetzt. Aus verschiedenen Berechnungen hat sich ergeben, dass eine kleinste Schrittweite von 0,01 ausreicht, um den Schnittpunkt zu finden.

Die Mindestabmessungen für Rechteckstützen betragen  $b/d=30/30$  cm und für Rundstützen  $\varnothing=30$  cm. Damit sind die nach DIN 4102 Teil 4 und nach [91] erforderlichen Mindestabmessungen für unbedeckte Stützen mit mehrseitiger Brandbeanspruchung erfüllt.

#### 6.3.2.7 Verbundstütze

Die Berechnung der Verbundstützen erfolgt nach EC 4 sowie einem vereinfachten brandschutztechnischen Verfahren nach [16]. Zur Berechnung und Bemessung werden folgende Annahmen getroffen:

- Das betrachtete Grundmodul eines Bürobaus hat in der Regel einen rechteckigen Grundriss. Das zugehörige Tragwerk wird in Verbundbauweise als gerichtetes System geplant. Infolge der oben getroffenen Annahme, dass Verbundträger als Einfeldträger ausgeführt werden, können die Stützen durchlaufend gefertigt werden. Stützen aus Walzprofilen haben den Vorteil, dass die Trägeranschlüsse problemlos ausgeführt werden können. Darüber hinaus können die Schraubanschlüsse so ausgeführt werden, dass diese ohne zusätzliche Maßnahmen den Brandschutz erfüllen. Bei Rund- oder Rechteckrohren sind die Anschlüsse schwieriger und die Betonfüllung kann nur geschossweise eingebracht werden, womit die Montage mehrgeschossiger Stützen nicht mehr möglich wird. Aus diesen Gründen werden hier nur Stützen aus kammerbetonierten Stahlprofilen verwendet.
- Es werden nur Profile der Reihen HEA, HEB und HEM verwendet.
- Die Auswahl des Profils erfolgt nach der geringsten Querschnittsfläche.
- Als Brandschutzbewehrung werden genau 4 Bewehrungsstäbe vorgesehen, die mit jeweils 50 mm Achsabstand zum freien Betonrand und zur Innenseite des Flansches angeordnet sind. Diese Längsbewehrung wird durch Bügel  $\varnothing 6$  im Abstand von 25 cm, die an den Steg angeschweißt sind, gehalten.

- Infolge einer Gesamtstabilität des Grundmoduls, das durch Decken- und vertikale Wandscheiben ausreichend ausgesteift ist, werden die Stützen als geschoßhohe Pendelstützen berechnet.
- Momente, die infolge außermittiger Trägeranschlüsse entstehen, werden im Rahmen dieser Berechnung vernachlässigt.

#### 6.3.2.8 Giebelwand

Die Giebelwand wird als Stahlbetonscheibe mit einer Dicke von 24 cm und einer mittigen Fensteröffnung ausgeführt. In Anlehnung an den Entwurf der Edding AG wird die Öffnung zwischen den beiden Scheiben über alle Geschosse geführt. Die beiden Wände ragen 80 cm über die Oberkante des Dachgeschosses hinaus und sind in diesem Bereich über die gesamte Gebäudebreite durchgängig. Die Breite der Wandscheibe von der Außenkante bis zur Öffnung wird in Abhängigkeit der allgemeinen Stützenstellung und der Stellung der Außenstützen berechnet.

Bei drei Stützenreihen in Gebäudequerrichtung berechnet sich die Scheibenbreite mindestens aus der Tiefe der Standardbüros plus der Trennwanddicke. Im Fall, dass die Außenstütze außen vor der Fassade angeordnet ist, berechnet sich die Scheibenbreite aus der Tiefe der Standardbüros plus der Trennwanddicke plus dem Achsabstand Außenstütze zur Fassade.

Bei vier Stützenreihen wird die Scheibenbreite gleich dem Abstand der zwei äußeren Stützenreihen in Gebäudequerrichtung berechnet. Bei innenliegender Stützreihe wird die Scheibenbreite bis an die Fassade angenommen.

#### 6.3.2.9 Kellerwand

Die Kellerwand wird als zweiseitig gehaltene Wand berechnet, die durch horizontale Kräfte aus Anschüttung und Verkehrslast belastet wird. Als Verkehrslast wird eine Last von 2,0 kN/m<sup>2</sup> angenommen. Darüber hinaus wird die Wanddicke mit 20 cm festgelegt. Die Bemessung erfolgt als einachsig gespannte Platte nach EC 2. Die Bewehrung wird für Erddruck und Verkehrslast berechnet und als zweilagige Bewehrung eingebaut. Für Verbügelung und sonstigen Stabstahl werden pauschal 5% der Mattenbewehrung angesetzt.

#### 6.3.2.10 Bodenplatte

Die Bodenplatte wird mit einer Dicke von 20 cm ausgeführt und zweilagig mit Q 188 Matten bewehrt. Da die Stützen und Wände auf Einzel- bzw. Streifenfundamenten gegründet sind, ist die Bodenplatte nur durch die direkten Flächenlasten des Keller- oder Erdgeschosses belastet. Diese Lasten werden zudem direkt in den Untergrund abgegeben, so dass nur eine konstruktive Bewehrung notwendig wird. Es wird angenommen, dass die Platte ohne zusätzliche Rissbewehrung hergestellt werden kann.

#### 6.3.2.11 Fundamente

Für die Gründung des Grundmoduls wird angenommen, dass die Stützen auf Einzelfundamenten, die Keller- und Stirnwände auf Streifenfundamenten gegründet werden. Für die Stirn- und Kellerwände (sofern vorhanden) werden bewehrte Streifenfundamente ohne besonderen Nachweis ausgeführt, da der Einfluss aus unterschiedlichen Entwurfsparametern nur gering ist. Für die Bemessung der Einzelfundamente werden nachfolgende Annahmen getroffen:

- Es wird von einer mittleren Bodenpressung von  $\sigma_0=250$  kN/m<sup>2</sup> ausgegangen.
- Da die meisten Fundamente nur für Normalkraft bemessen werden, wird ein quadratisches Fundament ermittelt.
- Auf Grenzabstände, die zu exzentrisch belasteten Fundamenten bzw. zu Plattenfundamenten führen, wird nicht eingegangen.
- Die Berechnung der Bewehrung erfolgt mit Hilfe einer Momentenverteilung nach [30]

- Bei erforderlicher Durchstanzbewehrung wird die Fundamenthöhe so lange vergrößert, bis die Durchstanzgefahr beseitigt ist.
- Infolge von Durchlaufträgern mit kurzen Randstützweiten und großen Innenstützweiten kann es vorkommen, dass eine Zugkraft verankert werden muss. In diesem Fall wird diese Zugkraft über ein Schwergewichtsfundament im Boden verankert. Dieses Fundament wird geometrisch als Würfel ausgeführt. Stützweiten, die abhebende Kräfte zur Folge haben, sind sehr ungünstig und sollten nicht verwendet werden. Durch die Verwendung eines Schwergewichtsfundamentes mit großen Abmessungen wirkt sich die ungünstige Stützenstellung insgesamt nachteilig auf den Entwurf aus. Dies wird entsprechend bei einer Entwurfsoptimierung berücksichtigt.

### 6.3.3 *Programmoberfläche*

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Software orientiert sich bei der Oberfläche an den Standard-Windows-Anwendungen. So können alle Befehle über Funktionsschalter (Buttons) betätigt werden. Zusätzlich dazu existiert eine Menüzeile, die noch einmal die wichtigsten Befehle enthält. Die Grundstruktur ist als SDI (Single Document Interface) aufgebaut. Das bedeutet, dass nur ein Dokument gleichzeitig geöffnet werden kann. Dies ist aber deswegen kein Nachteil, da eine Seite der Oberfläche alle wesentlichen Daten nacheinander durchgeführter Berechnungen grafisch darstellt und somit eine gute Möglichkeit besteht, die Ergebnisse zu vergleichen.

Während einer Optimierung werden die einzelnen Ergebnisse des jeweils besten Individuums fortlaufend notiert und der zugehörige Grundriss grafisch dargestellt. Der Fortgang der Optimierung wird in einer Grafik aufgezeigt. Hier werden die Fitnesswerte des besten und des schlechtesten Individuums sowie der durchschnittliche Fitnesswert dargestellt. In den folgenden Abbildungen sind die oben beschriebenen Oberflächen abgebildet.

Abbildung 6-2: Registerseite Eingabe Parameter (Startseite)

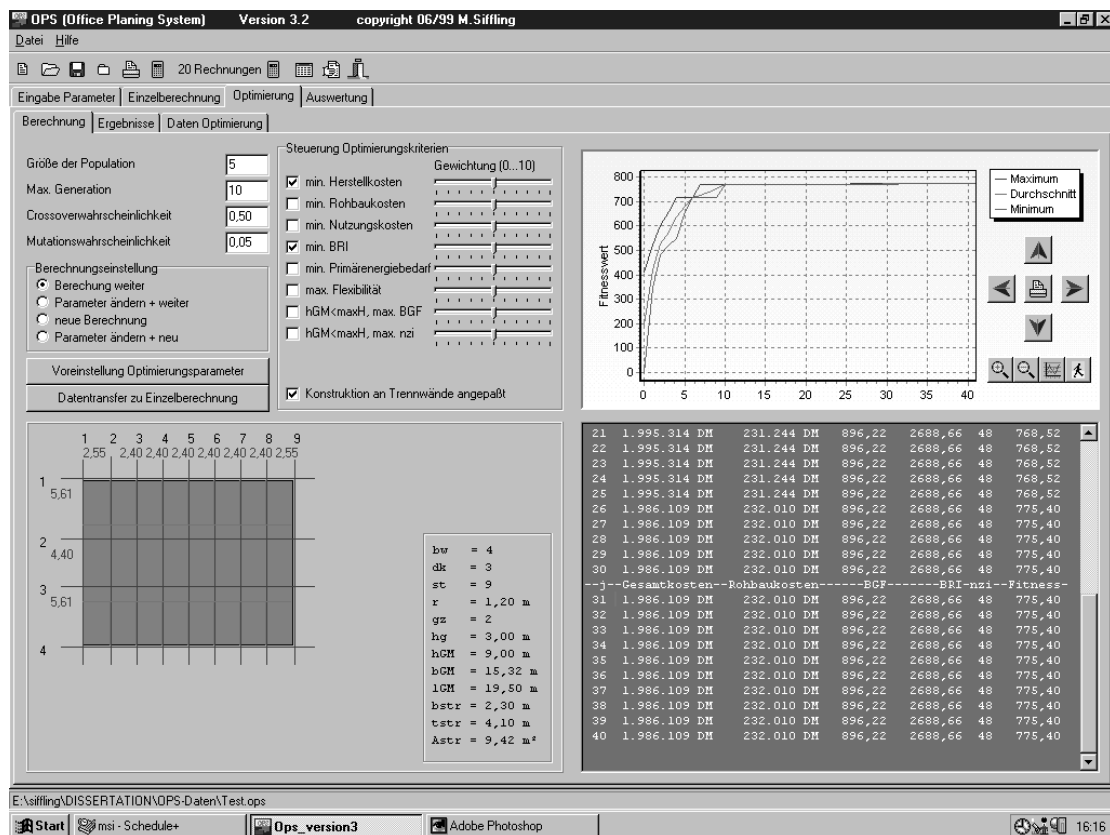


Abbildung 6-3: Registerseite Optimierung

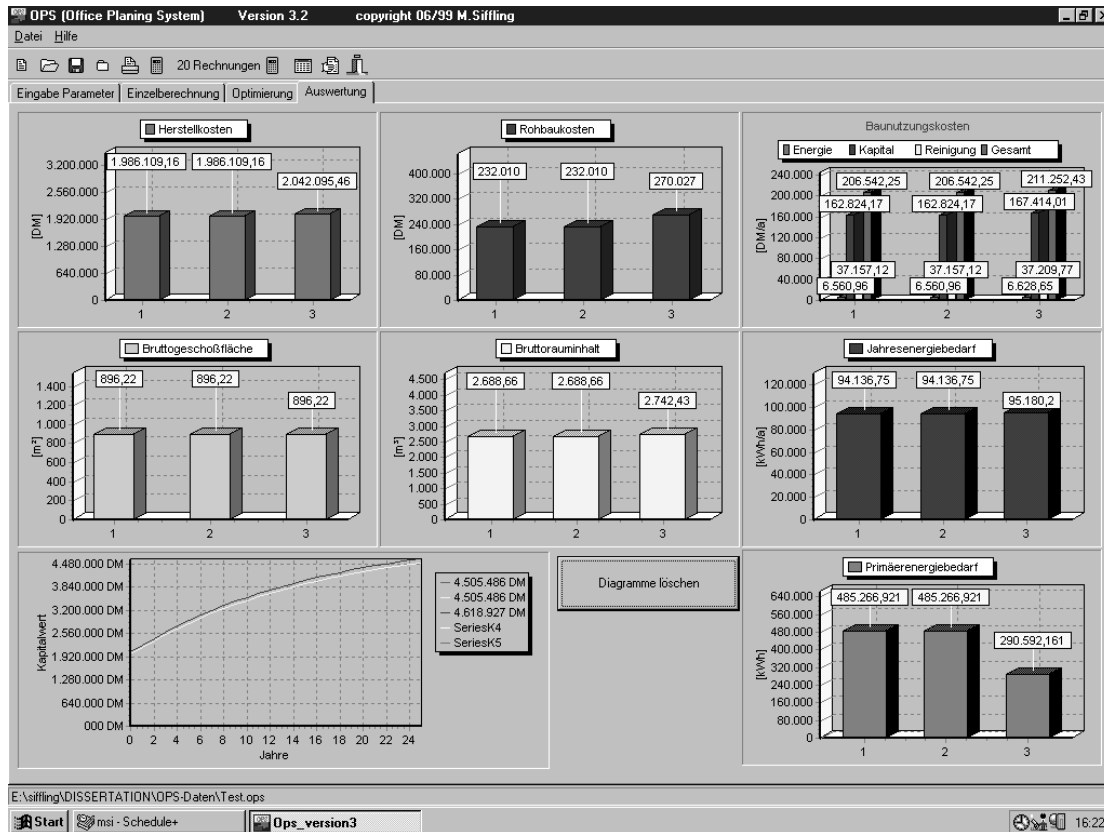


Abbildung 6-4: Registerseite Auswertung

## 7 Parameterstudien am Beispiel der Edding AG Ahrensburg

### 7.1 Allgemeines

Das im Zusammenhang mit dieser Arbeit definierte ganzheitliche Optimierungs- und Bewertungsmodell wird am Beispiel der Edding AG Ahrensburg getestet. Dieses Projekt ist deshalb ausgewählt worden, weil hier ganz klare Büromodule, die durch eine sogenannte Verbindungsstraße miteinander gekoppelt sind, ausgeführt wurden. Diese eignen sich sehr gut für Vergleichsberechnungen.

### 7.2 Edding AG Ahrensburg

#### 7.2.1 Baubeschreibung

Das Gebäude liegt in einem Gewerbegebiet am Rande von Ahrensburg bei Hamburg. Die Aufgabe, ein Bürohaus für 130 Arbeitsplätze zu entwerfen, wurde derart gelöst, dass entlang einer Erschließungsstraße vier einzelne Häuser angeordnet sind. Die jeweils gegenüberliegenden Häuser haben zwei Geschosse + Keller bzw. drei Geschosse, wobei die Geschosse über eine sogenannte Split-Level-Anordnung verbunden sind. Die einzelnen Häuser sind gemäß der Definition im Kapitel 4 als Büromodule ausgeführt. Dem Entwurf liegt eine Kombistruktur als Organisationsform der einzelnen Bürogeschosse zugrunde. Bemerkenswert ist hier die Tatsache, dass der Architekt Hans Struhk und seine Mitarbeiter diese Bürostruktur als erste in Deutschland eingeführt und gebaut haben.



Abbildung 7-1: Ansicht

Die Geschossgrundrisse sind ungefähr 300 m<sup>2</sup> groß und enthalten 16 Einzelbüros, die über eine Gemeinschaftszone miteinander verbunden sind. Über ein großzügiges Treppenhaus sind die einzelnen Häuser mit der Erschließungsstraße verbunden.



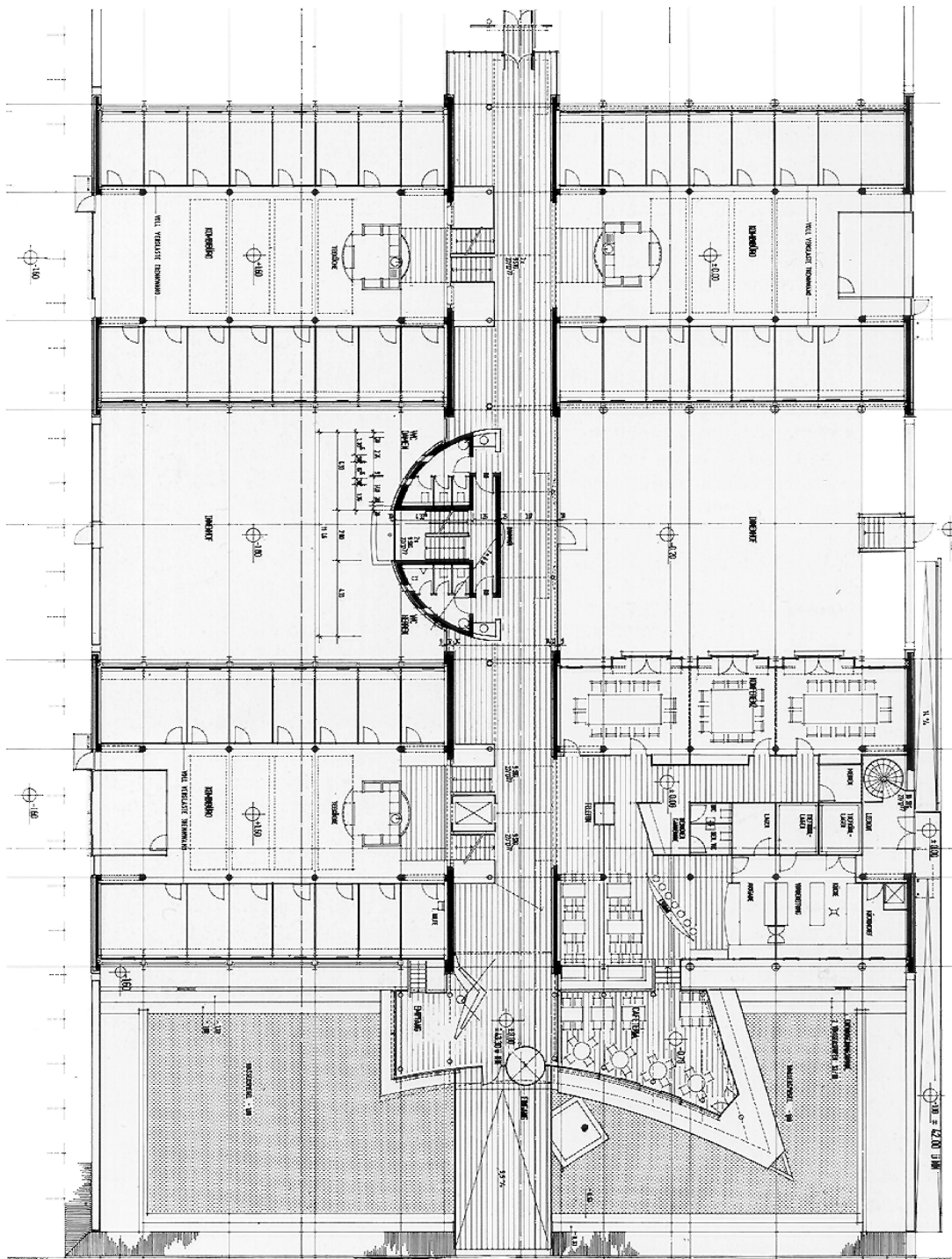


Abbildung 7-2: Grundriss Erdgeschoss

Das Gebäude ist als Stahlbetonskelett mit außenstehenden Stahlstützen und einer Stahlbetonflachdecke ausgeführt. Die Fassade ist eine Alu-Rahmen-Konstruktion mit Holzfenstern und neutralem Isolierglas. Die Fenster sind als Dreh-Kipp-Fenster ausgebildet, mit äußeren ausstellbaren Markisen.

Die Beheizung der Einzelbüros erfolgt durch individuell regelbare Strahlheizkörper. Bei den inneren Gemeinschaftszonen sind die baulichen Voraussetzungen für eine spätere Be- und Entlüftungsanlage bereit geschaffen worden. Die horizontale Installationsführung für Stark- und

Schwachstrom in den Büroebenen erfolgt durch eine Kombination von einer 1,20 m breiten Doppelbodentrasse und einem estrichüberdeckten Hohlraumboden.

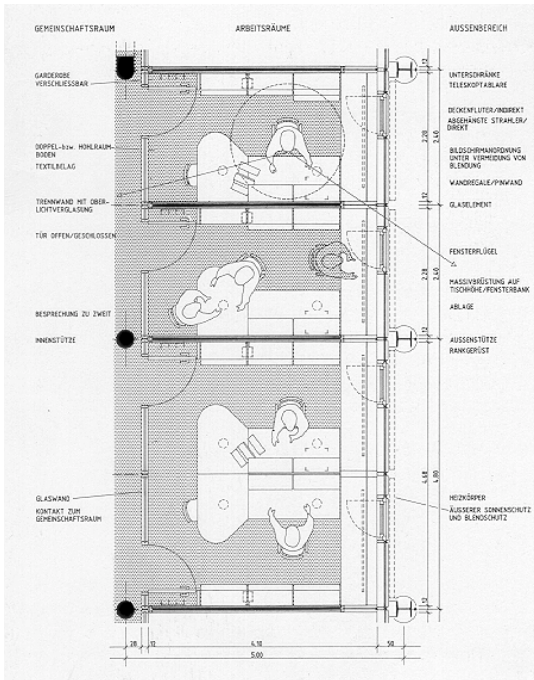


Abbildung 7-3: Grundriss + Innenansicht Standardbüro

Die Einzelräume sind mit 9,44 m<sup>2</sup> knapp bemessen, wirken durch die Glaswände zum Flur und die Glasbänder der Zwischenwände zur Fassade aber größer. Für die Einzelarbeit im Sitzen ist für alle Arbeitssituationen genügend Platz vorhanden, der Bewegungsraum ist etwas eingeschränkt. Jeder Arbeitsplatz im Einzelraum hat seine eigene Besprechungszone, die auch intensiv genutzt wird. Einige Arbeitsbereiche der Gemeinschaftszone werden wegen ihrer offenen Anordnung kaum benutzt. Die Transparenz der Innenzone leidet durch die vielen hohen Registraturschränke. Dadurch ist auch ein Blickkontakt zwischen den Angestellten in gegenüberliegenden Räumen selten möglich.



Abbildung 7-4: Ansicht Gemeinschaftszone

Im Verlauf der weiteren Bearbeitung werden Vergleichsberechnungen am Beispiel des Hauses 3, bestehend aus drei Bürogeschossen ohne Keller, vorgenommen.



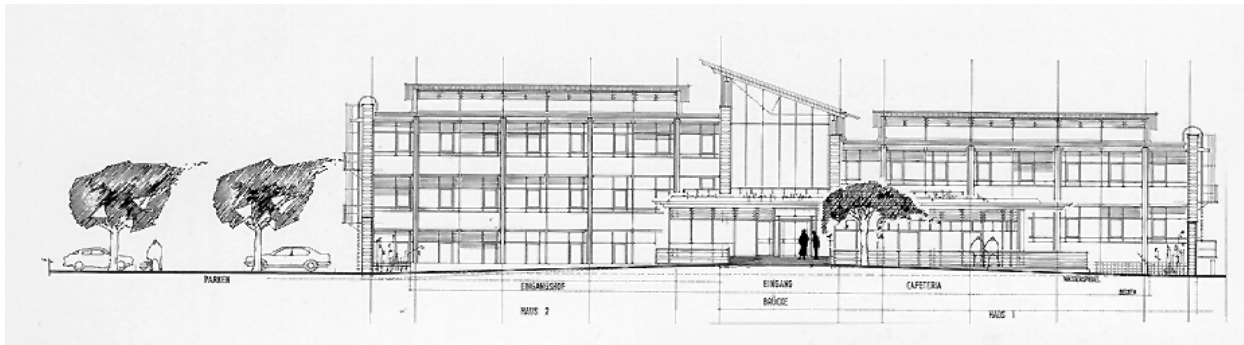


Abbildung 7-5: Ansicht Haus 3

### 7.2.2 Baukonstruktive Durchbildung

Im folgenden werden die verschiedenen Baukonstruktionen der Edding AG beschrieben und Ansätze für die Parameterstudien abgeleitet. Alle Ansätze basieren auf tatsächlich ausgeführten Konstruktionen.

Für die Wärmebedarfsberechnung ist die Angabe der K-Werte und für Glas die Angabe des Gesamtenergiedurchlasses ( $g_f$ ) erforderlich.

Bei Fassaden und Stirnwänden wird zusätzlich das Verhältnis von geschlossener Fläche zu Fensterfläche angegeben.

#### 7.2.2.1 Dachaufbau

Die Dachkonstruktion besteht aus einer Betonflachdecke, die in den mittleren drei Feldern ausgespart ist. In diesem Bereich ist ein Oberlicht aus einer leichten Stahlkonstruktion vorhanden. Diese Konstruktion ist mit Trapezblech gedeckt. An den Längsseiten sind Lichtbänder angeordnet.

Der gesamte Dachbereich ist mit einer 18 cm dicken Dämmung ausgeführt. Die Dachabdichtung erfolgt über eine bituminöse Dichtungsbahn. Für die Vergleichsberechnungen in dieser Arbeit werden folgende Annahmen und Vereinfachungen vorgenommen:

- Die Dachkonstruktion wird mit einer großen mittigen Öffnung berechnet. Die Öffnung wird in der statischen Berechnung vernachlässigt und die gesamte Dachfläche berechnet. Bei der Ermittlung der Rohbaukosten werden die Massen für die Deckenkonstruktion entsprechend der Größe der Öffnung abgemindert.
- Die leichte Stahlkonstruktion der Oberlichts wird als zusätzliche Last auf die Dachkonstruktion vernachlässigt, da der Lastanteil der Öffnung in der Regel größer als der Anteil der Stahlkonstruktion ist und in der Berechnung der Deckenkonstruktion berücksichtigt wird.
- Die Gesamtkosten der Dachkonstruktion inklusive Oberlicht werden in Abhängigkeit der vorhandenen Flächen und Massen ermittelt. Daraus wird für die weitergehenden Berechnungen ein Einheitspreis pro  $m^2$  Dachfläche berechnet. Für die nachfolgenden Vergleichsberechnungen wird der Einheitspreis mit 583,75 DM/ $m^2$  berücksichtigt.
- Für die Wärmebedarfsberechnung wird ein allgemeiner K-Wert von 0,212 W/ $m^2K$  verwendet.

#### 7.2.2.2 Fassade

Die Längsfassade besteht aus einer 82 cm hohen Brüstungsmauer, die mit einer außenliegenden Dämmung und einer äußeren Verkleidung versehen ist. Oberhalb der Brüstungsmauer ist die Fassade verglast. Der Anteil der geschlossenen Fassade beträgt 34,4% und der Anteil der

offenen Fassade beträgt 65,6%. Damit ist der Fensteranteil der Fassade kleiner als 2/3 und es darf die gesamte Fensterfläche für solare Warmegewinne berücksichtigt werden.

Die Geschosshöhe der Edding AG beträgt 3,20 m. Diese Höhe wird sich bei den Vergleichsrechnungen nur in geringem Umfang ändern,  $\pm 20$  cm, so dass mit ausreichender Genauigkeit die Kosten der Fassade bezogen auf die Fassadenfläche berechnet werden können.

Die Fassade wird mit folgenden Variablen beschrieben:

- Die Fassadenkosten werden mit 831,00 DM/m<sup>2</sup> angesetzt.
- Der K-Wert des geschlossenen Fassadenbereichs beträgt 0,407 W/m<sup>2</sup>K. Die Verglasung wird mit einem K-Wert von 1,2 W/m<sup>2</sup>K und einem Gesamtenergiedurchlass von  $g_f=0,7$  berücksichtigt. Der Fensteranteil beträgt 65,6%.
- Die Fassadenlast wird als Linienlast parallel zur Gebäudelängsseite berücksichtigt. Die Last beträgt 6,5 kN/m.

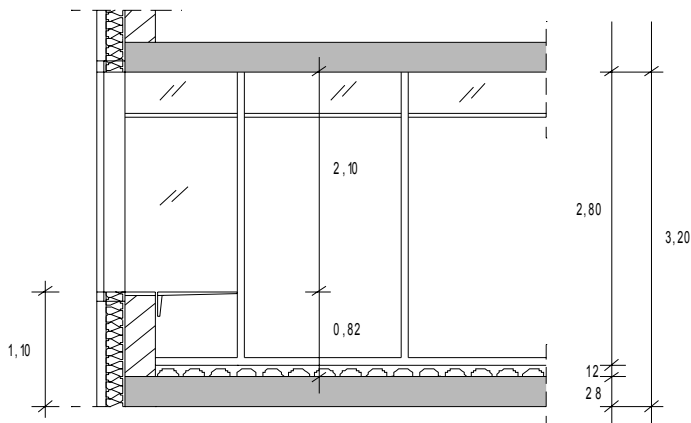


Abbildung 7-6: Vertikalschnitt Längsfassade

### 7.2.2.3 Giebelwand

Die Giebelwand ist als aussteifende Stahlbetonwand ausgeführt. Der Wandaufbau besteht aus einer 24 cm starken Stahlbetonwand, 8 cm Dämmung, 4 cm Luftschicht und aus einer 9 cm starken Vorsatzschale. Zusätzlich werden im Bereich der Kombizone Öffnungen in der Giebelwand vorgesehen. Zum einen dient die Öffnung als Verbindung zur Erschließungsstraße des Gesamtkomplexes, und zum anderen wird die Öffnung mit einer Glasfassade versehen. In dieser äußeren Glasfassade sind Fluchttüren angeordnet, die zu einer Feuerleiter führen. Die Giebelwand ist mit einem Dachüberstand von 80 cm ausgeführt.

Allgemein wird die Giebelwand mit folgenden Variablen beschrieben:

- Kosten geschlossener Bereich: 410,40 DM/m<sup>2</sup>  
In diesen Kosten sind bereits die Mehrkosten für die Ausbildung der Stirnseiten der Giebelwände eingerechnet.
- K-Wert geschlossener Bereich: 0,392 W/m<sup>2</sup>K
- Kosten Glasfassade: 850,00 DM/m<sup>2</sup>
- K-Wert Glasfassade: 1,700 W/m<sup>2</sup>K
- Gesamtenergiedurchlass Glas: 0,62
- Die Größe einer Öffnung in der Giebelwand wird durch den Fensteranteil [%] beschrieben.
- Die konstruktive Ausbildung der Öffnung wird nicht näher untersucht. In der Berechnung der Rohbaukosten wird die Giebelwand durch zwei 5 m breite und 10,70 m hohe Scheiben idealisiert (siehe auch Kapitel 7.2.2.8).

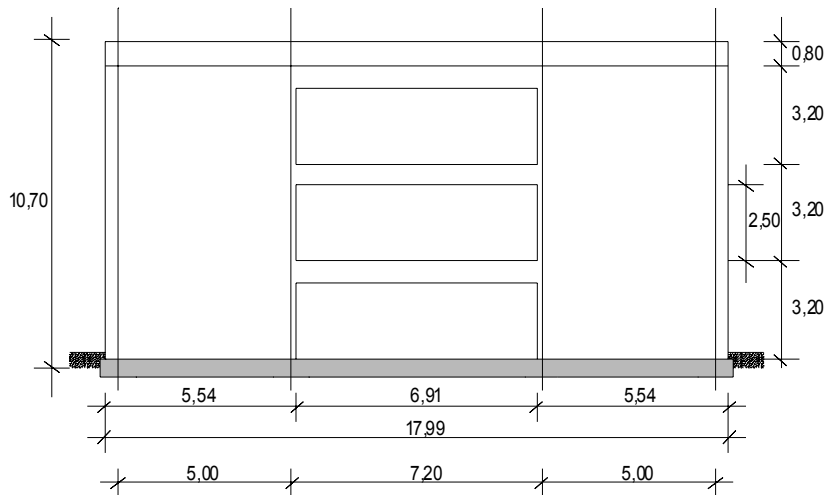


Abbildung 7-7: Giebelwand Edding AG

#### 7.2.2.4 Sohle

Die Bauwerkssohle besteht von unten nach oben aus einer 20 cm dicken Kiesschicht, einer Trennfolie und einer 20 cm dicken Betonsohlplatte. Wahlweise kann der Fußboden gedämmt werden, wobei die Lage der Dämmung zuerst vernachlässigt wird. Die Massen der Konstruktion und die daraus resultierenden Kosten werden in der Ermittlung der Rohbaukosten berücksichtigt. Lediglich die Kosten der Dämmung sowie der zugehörige K-Wert sind für die Ausbaurkosten und die Wärmebedarfsberechnung notwendig. Für die Vergleichsberechnung werden für die Dämmkosten 120,00 DM/m<sup>2</sup> und für den K-Wert 0,342 W/m<sup>2</sup>K angesetzt.

#### 7.2.2.5 Trennwände

Bei der Edding AG wird ein Holzständersystem mit 10 cm Dicke und einem Lastzuschlag von 0,75 kN/m<sup>2</sup> verwendet. Die Kosten der Trennwand werden mit 563,35 DM/m<sup>2</sup> angesetzt.

#### 7.2.2.6 Fußbodenaufbau

Der Fußbodenaufbau besteht aus einem Hohlraumboden mit einem in der Gemeinschaftszone angeordneten Doppelbodenkanal. Die Höhe des Fußbodenaufbaus beträgt 12 cm.

#### 7.2.2.7 Deckenkonstruktion

Die Untersicht der Deckenkonstruktion wird als Sichtbeton ausgeführt. Auf eine Unterdecke und einen Deckenputz wird verzichtet.

### 7.2.3 Basisdaten

Das Haus 3 der Edding AG wird durch nachfolgende Entwurfsvariablen genau beschrieben. Hierbei wird in feste und freie Entwurfsvariablen unterschieden. (siehe Kapitel 4)

#### Feste Variablen:

Bürotyp	Kombibüro
Bürostruktur	Kombistruktur
Definition Standardbüro	
Fläche Standardbüro	9,43 m <sup>2</sup>
Fläche pro Arbeitsplatz	15,16 m <sup>2</sup>

Arbeitsplätze pro Raum	1 AP mit $h_f = t / 1,5$ , bei einreihiger Anordnung
Anzahl Büros pro Geschoss	16 Standardbüros
Anzahl Büros pro Grundmodul	48 Standardbüros
Maximale Raumgröße	<100 m <sup>2</sup>
Lichte Raumhöhe	2,80 m, Ausreichend gemäß AStVO
Raumtiefe Standardbüro	4,10 m
Raubbreite Standardbüro	2,30 m
Tiefgarage	keine Tiefgarage vorhanden
Deckensysteme	
Decke Dachgeschoss	Deckensystem mit großer mittlerer Öffnung Dachoberlicht aus Stahl
Decke Normalgeschoß	keine Öffnung
Erdgeschoss	Nutzung und Geschosshöhe wie Normalgeschoß
Kellergeschoss	kein Keller vorhanden
Lasten	
Schneelast	$s_0=0,75 \text{ kN/m}^2$
Verkehrslast Dach	$p_{DG}=0.00 \text{ kN/m}^2$
Ausbauast Dach	$\Delta g_{DG}=0,26 \text{ kN/m}^2$
Verkehrslast Normalgeschoß	$p_{NG}=5.00 \text{ kN/m}^2$
Ausbauast Normalgeschoß	$\Delta g_{NG}=2,00 \text{ kN/m}^2$
Eigengewicht Längsfassade	$g_{Fas}=6,5 \text{ kN/M}$
Angaben für Energiebilanz	
Tageslichtemissionsgrad	0,76
Nennbeleuchtungsstärke	300 Lux
Geografische Lage	Hamburg
Heizgrenztemperatur	12°C
Gradtagzahl	3612
Ausrichtung	Kern ("Erschließungsstraße") im Norden
Materialeigenschaften	
Beton	C 25/30
Bewehrungsstahl	BSt 500 S/M
Baustahl	Fe 510
Brandschutz	
Feuerwiderstandsklasse	F 90
Fluchtweg	einseitiger notwendiger Fluchtweg im Gebäude Zweiter Fluchtweg über Rettungsleiter
Finanzierung	
Zinssatz Eigenkapital	5,0%
Zinssatz Fremdkapital	8,0%
Anteil Eigen- zu Fremdkapital	50/50
Betrachtungszeitraum	25 Jahre
Baukonstruktive Durchbildung	(siehe hierzu Kapitel 7.2.2)

**Freie Variablen:**

Trennwandtyp	Holz-Elementtrennwand (siehe Kapitel 7.2.2.5)
Trennwanddicke	10 cm
Flächengewicht Trennwand	<100 kg/m <sup>2</sup>
Unterdecke	keine, Deckenuntersicht nicht verputzt
Elektroinstallation	Installationsführung im Hohlraumboden
Heizungs- Lüftungsinstallation	keine Lüftungsanlage

Fußbodentyp	Hohlraumboden, h=12 cm (siehe Kapitel 7.2.2.6)
Rastergrundmaß	r=1,20 m
Rastereinteilung Konstruktion	n <sub>b</sub> =2
Rasterart	Ausbau- Konstruktionsraster deckungsgleich
Stellung der Außenstütze	außen vor der Fassade
Abstand Außenstütze Fassade	35 cm
Stellung der Innenstütze	vor der Trennwand auf Flurseite
Abstand Innenstütze Trennwand	15 cm
Geschosszahl	3 Vollgeschosse
Flurbreite	1,10 m
Längsgeometrie	Beide Randfelder kleiner als Innenfelder
Steuerung Trennwände Konstruktion	Konstruktion an Trennwände angepasst
Tragsystem	dreifeldige Konstruktion ohne Tiefgarage
Deckenkonstruktion	Stahlbetonflachdecke
Bauweise	Ortbeton-Skelettbau
Stützenquerschnitt	StB-Rundstützen

Die für die Kostenberechnung verwendeten Einzelkosten sind aus der Literatur, aus eigenen Erfahrungswerten und aus der Baukostenauswertung der Edding AG zusammengestellt. Die einzelnen Preisdaten sind im Anhang 4 zusammengestellt.

#### 7.2.4 Vergleichsberechnung Edding AG, Haus 3

Als Basis aller Vergleichsberechnungen werden für das Haus 3 der Edding AG Ahrensburg die Entwurfparameter und die Entwurfskriterien definiert bzw. berechnet. Die oben beschriebenen Parameter sind in nachfolgender Tabelle zusammengestellt.

Ausführung in Ortbeton

Freie Variablen				Ergebnis Geometrie			
tw	5	sta	5	bw	2	l1	5,00
tw	0,10	dsta	0,30	st	9	l2	7,20
dp	0,75	stafac	0,50	dk	6	bGM	16,20
udt	2	astaf	0,35	geo	3	b	4,80
hud	0,00	lfas	0,50	Profilwahl	1	nk	3
eli	1	lky	0,00	Deckenart	2	br	2,40
hli	1	sti	1	Mont	1	IGM	19,50
hi	0,00	dsti	0,30	StTyp	2	hg	3,20
fbt	2	astitw	0,15	FlexSteu	1	hGM	9,60
hfb	0,12	gz	2			nx	5
ft	3	flurb	1,10			ny	3
r	1,20	astp	keine			nzi	16
nb	2	bv	Tief-			bstr	2,30
Ra	1	bfg	Garage			tstr	4,10
		d	-"			Astr	9,42

Tabelle 7-1: Werte freie Variablen und Ergebniswerte Geometrie

Aus den Entwurfsparametern werden nachfolgende Kriterien berechnet.

Ausgabe der Kriterien:

#### Baukosten

Rohbau	348.614 DM
Dachaufbau	184.407 DM
Fassade	541.382 DM
Fußboden	194.279 DM
Deckenbekleidung	0 DM
Kosten Trennwände	453.339 DM
Fußboden gegen Erde	37.908 DM
Elektroinst.	236.356 DM
Heizungs/Lüftungsinst.	257.774 DM
<u>aktiver Brandschutz</u>	<u>0 DM</u>
Summe Ausbaukosten	1.905.445 DM

---



---

Summe Herstellkosten	2.254.058 DM
----------------------	--------------

#### Betriebskosten

Kapitalkosten	184.791 DM/a
Energiekosten	7.105 DM/a
<u>Reinigungskosten</u>	<u>39.502 DM/a</u>
Betriebskosten/a	231.398 DM/a

#### Geometrieparameter

BGF	947,70 m <sup>2</sup>
BRI	3032,64 m <sup>3</sup>
Trennwandfläche	804,72 m <sup>2</sup>
Kosten pro m <sup>2</sup> BGF	2378,45 DM/m <sup>2</sup>
Kosten pro m <sup>3</sup> BRI	743,27 DM/m <sup>3</sup>
Kosten pro AP	46.960 DM/AP
Jahresenergiebedarf	102067,50 kWh/a
Gesamt Zimmeranzahl	48 Büros
Primärenergiebedarf	458.099,29 kWh
Flexibilitätskriterium	8,00

## 7.3 Vergleichsberechnungen

### 7.3.1 Allgemeines

Ziel dieses Kapitels ist es, am Beispiel von Bürogeschossbauten die Funktions- und Gebrauchsfähigkeit des entwickelten ganzheitlichen Modells nachzuweisen. In den vorangehenden Kapiteln wurden die Allgemeingültigkeit und die Ganzheitlichkeit bereits gezeigt. Zurückblickend auf die eingangs erwähnte Fragestellung nach der Wettbewerbsfähigkeit der Verbundbauweise, wird daher der Schwerpunkt der Berechnungen auf den Vergleich von Ortbeton- und Verbundbauweise gelegt.

Die Vergleichsberechnungen werden als Optimierungsberechnungen durchgeführt. Dabei wird die Variable für die Bauweise als feste Variable vorgegeben. Durch diese Vorgabe ist es möglich, gemäß den vorgegebenen Optimierungskriterien die bestmöglichen Ergebnisse in Abhängigkeit der jeweiligen Bauweise zu ermitteln.

Bei der Vielfalt der Kriterien, der möglichen Kombinationen und der zusätzlichen Variation von Eingabevariablen beschränken sich die Vergleichsberechnungen im wesentlichen auf Kostenkriterien und auf die Minimierung des BRI. Bei den Vergleichsberechnungen wird sowohl nach Einzelkriterien als auch nach Kriterienkombinationen optimiert. Die Systematik dieser Berechnungen wird in nachfolgenden Kapiteln näher erläutert.



### 7.3.2 Systematik der Vergleichsberechnungen

Die prinzipielle Systematik der Vergleichsberechnungen beruht darauf, dass Optimierungen sowohl nach den Einzelkriterien als auch nach verschiedenen Kriterienkombinationen durchgeführt werden. Bei Optimierung nach Einzelkriterien sind nicht alle im Kapitel 6 vorgestellten Kriterien sinnvoll. Die für den Vergleich mit der Edding AG verwendeten Kriterien werden nachfolgend diskutiert.

- Kriterium Herstellkosten (Optimierung 1)  
In diesem Fall ist das Ziel der Optimierung die Minimierung der Herstellkosten. Es werden sowohl für die Ort beton- als auch für die Verbundbauweise Berechnungen durchgeführt.
- Kriterium Rohbaukosten (Optimierung 2)  
Ziel dieser Optimierung ist die Minimierung der Rohbaukosten.
- Kriterium Nutzungskosten (Optimierung 3)  
In diesem Fall ist das Ziel die Minimierung der Baunutzungskosten, die als jährliche Kosten des Bauwerks auftreten.
- Kriterium Bruttorauminhalt (BRI)  
Ziel ist die Minimierung des Bruttorauminhaltes. Der BRI hängt allein von der Grundfläche und der Gebäudehöhe ab, so dass mehrere Lösungen mit unterschiedlicher Bauweise und mit unterschiedlichen Konstruktionen, aber mit gleichem BRI existieren. Da in diesem Fall kein eindeutiges Optimum existiert, ist es nicht sinnvoll, Berechnungen allein mit diesem Kriterium durchzuführen. Aus diesem Grund wird das Kriterium des minimalen BRI immer in Kombination mit anderen Kriterien eingesetzt.
- Kriterium Primärenergiebedarf  
Ziel dieser Optimierung ist die Minimierung des Primärenergiebedarfs des Rohbaus. In Kapitel 6 ist nur ein sehr einfacher Ansatz zur Berechnung des Primärenergiebedarfs vorgestellt worden. Da dieses Kriterium nur ansatzweise im EDV-Modell enthalten ist, wird eine Optimierung nach diesem Kriterium nicht vorgenommen.
- Kriterium Flexibilität  
Ziel dieser Optimierung ist die Maximierung der Flexibilität der Geschosse. Da infolge unterschiedlicher Geometrien, Bauweisen, Konstruktionen etc. mehrere Lösungen mit gleicher Qualität existieren, soll dieses Kriterium nur in Kombination mit anderen Kriterien verwendet werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird das Flexibilitätskriterium nicht verwendet.
- Kriterium vorgegebene Gebäudehöhe und Bruttogrundfläche (BGF)  
Bei dieser Optimierung ist die Maximierung der BGF unter der Nebenbedingung, dass die Gebäudehöhe ein vorgegebenes Maß nicht überschreitet, das Ziel. Dieses Kriterium ist beispielsweise bei innerstädtischen Grundstücken von Bedeutung, wenn die vermietbaren Flächen bei vorgegebener Bauhöhe maximiert werden sollen. Da es sich bei dem hier gewählten Vergleichsobjekt um ein Gebäude ohne Höhenvorgaben und mit nur drei Vollgeschossen handelt, wird dieses Kriterium nicht für Vergleichsberechnungen herangezogen.
- Kriterium vorgegebene Gebäudehöhe und Anzahl Standardräume  
Bei dieser Optimierung ist die Maximierung der Anzahl der Standardräume unter der Nebenbedingung, dass die Gebäudehöhe ein vorgegebenes Maß nicht überschreitet, das Ziel. Wie beim vorhergehenden Kriterium wird dieses Kriterium hier nicht für Vergleichsberechnungen herangezogen.

Aus den oben diskutierten Einzelkriterien werden nachfolgende Kriterienkombinationen für die Optimierungsberechnungen verwendet.

- Kombination Herstellkosten und Rohbaukosten (Optimierung 4)
- Kombination Herstellkosten und Nutzungskosten (Optimierung 5)  
Ziel dieser Optimierung ist es, eine Lösung zu finden, die sowohl minimale Herstellkosten, als auch minimale Nutzungskosten aufweist.
- Kombination Rohbaukosten und Nutzungskosten (Optimierung 6)

Die Nutzungskosten hängen u.a. von der Größe des BRI ab. Da aber der BRI in die Nutzungskosten über Jahresenergiebedarf und jährliche Energiekosten einfließt und die Energiekosten von den jeweiligen Marktpreisen abhängen, ist durch die Kombination von Herstellkosten und BRI eine Berechnung unabhängig von den genannten Einflüssen möglich.

- Kombination Herstellkosten und BRI (Optimierung 7)
- Kombination Rohbaukosten und BRI (Optimierung 8)

Die Ergebnisse dieser Vergleichsberechnungen sind im Anhang A3 zusammengestellt.

### 7.3.3 Sensitivitätsanalysen

Die Optimierungsergebnisse sind für die Kriterien BRI und Flexibilität unabhängig, d. h. dass diese Ergebnisse nicht von zusätzlichen Eingabegrößen abhängen. Dies ist bei den Kostenkriterien Herstellkosten, Rohbaukosten und Nutzungskosten nicht der Fall. Hierbei hat die Vorgabe der einzelnen Preise eine Auswirkung auf das Ergebnis. Die Veränderung der Preise ist von konjunkturellen, von lokalen Einflussgrößen und von individuellen Einflüssen abhängig. Das bedeutet, dass durch Veränderung der Einheitspreise die Ergebnisse beeinflusst werden.

Um eine Aussage über die Stabilität der Ergebnisse bei Verwendung der Kostenkriterien zu erhalten, werden sogenannte Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Hierbei werden die Auswirkungen auf die Ergebnisse in Abhängigkeit der Veränderung der Preisvorgaben untersucht. Da sich das wesentliche Augenmerk dieser Arbeit auf den Vergleich von Beton- und Verbundbauweise richtet, werden Variationen der Preise im Bereich der Ausbaurkosten und der Nutzungskosten nicht vorgenommen. Die Variation der Preise beschränkt sich auf die Rohbaukosten. Bei Verbundträgern ohne Deckenkonstruktion werden 80% der Kosten und bei Verbundstützen werden 70% der Kosten durch die Kosten des Profilstahls (komplett mit Anschlüssen und Beschichtung) bestimmt. Das bedeutet, dass die Kosten des Profilstahls einen wesentlichen Einfluss auf die Rohbaukosten bei Systemen in Verbundbauweise haben. Aus diesem Grund werden die Sensitivitätsanalysen derart durchgeführt, dass die Kosten des Profilstahls für Verbundträger und -stützen variiert werden.

Es werden folgende Variationen der Profilstahlkosten durchgeführt:

	Variation 4	Grundpreis	Variation 1	Variation 2	Variation 3
Verbundträger	1.500,- DM	2.000,- DM	2.500,- DM	3.000,- DM	3.500,- DM
Verbundstütze	1.800,- DM	2.400,- DM	3.000,- DM	3.600,- DM	4.200,- DM

Tabelle 7-2: Variation der Grundpreise für Profilstahl

## 8 Ergebnisse

### 8.1 Überblick

Es werden die Ergebnisse der Vergleichsberechnungen ausgewertet und erläutert. Aus diesen Überlegungen heraus werden Aussagen über den Einfluss und die Bedeutung der definierten Entwurfsvariablen gemacht.

Ein Schwerpunkt der durchgeführten Untersuchungen lag im Vergleich von Ortbeton- und Verbundbauweise. Dies ist auch darin begründet, dass sich die ursprünglichen Überlegungen dieser Arbeit mit der Verbundbauweise befasst haben.

Es hat sich herausgestellt, dass für die Ortbetonbauweise im Wesentlichen zwei unterschiedliche Geometrien als Optimierungsergebnisse existieren. Für die Verbundbauweise wurden mehrere Ergebnisse ermittelt, die aber auf zwei geometrischen Grundprinzipien aufbauen, einer Geometrie mit drei und einer mit vier Konstruktionsachsen in Gebäudequerrichtung. Zusätzlich variieren diese Lösungen in der Längsgeometrie (Variable geo).

Für die möglichen Lösungsgeometrien wurden Einzelberechnungen entsprechend der im vorangehenden Kapitel erläuterten Systematik durchgeführt. Bei den Verbundlösungen wurden zusätzlich die Profilkosten variiert.

Für die Einzelkriterien sowie für die Kriterienkombinationen sind die Ergebnisse in diesem Kapitel zusammengestellt. Das Haus 3 der Edding AG verwendet eine StB-Flachdecke und eine Stellung der Innenstütze vor den Bürotrennwänden auf der Flurseite. Diese Stellung der Innenstütze wirkt sich ungünstig auf die Geschossbreite und somit auf die BGF und den BRI aus. Darüber hinaus ist eine StB-Flachdecke teurer als eine Unterzugdecke. Da bei den Vergleichsberechnungen die Kosten und der Bruttorauminhalt als Kriterien verwendet wurden, und da diesbezüglich alle Berechnungsergebnisse besser sind als die ursprüngliche Lösung, wird diese in den Vergleich nicht mit einbezogen.

## 8.2 Auswertung Optimierungsergebnisse

### 8.2.1 Optimierung 1 (max. Herstellkosten)

Die Ergebnisse der Optimierung nach minimalen Herstellkosten sind in nachfolgender Tabelle zusammengestellt.

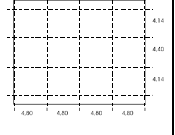
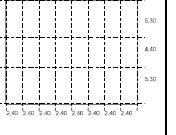
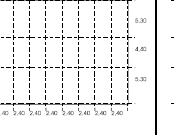
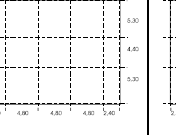
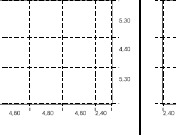
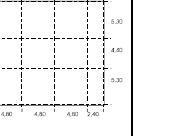
	Ortbeton	Verbund				
Geometrie	Geo-a	Geo-1-1	Geo-1-1	Geo-1-2	Geo-1-2	Geo-1-2
Variation		1	2	3	4	5
Profilträger		1500 DM/t	2000 DM/t	2500 DM/t	3000 DM/t	3500 DM/t
Profilstütze		1800 DM/t	2400 DM/t	3000 DM/t	3600 DM/t	4200 DM/t
Grundriss						
KHerstell	2.005.877 DM	1.983.206 DM	1.995.947 DM	2.008.737 DM	2.017.413 DM	2.026.089 DM
KRohbau	222.032 DM	229.216 DM	241.957 DM	230.831 DM	239.507 DM	248.182 DM
KAusbau	1.783.845 DM	1.753.990 DM	1.753.990 DM	1.777.906 DM	1.777.906 DM	1.777.906 DM
Hg	3,10 m	3,00 m	3,00 m	3,08 m	3,08 m	3,08 m
BRI	2.774,66 m³	2685,15 m³	2685,15 m³	2.756,75 m³	2.756,75 m³	2.756,75 m³
BGF	895,05 m²	895,05 m²	895,05 m²	895,05 m²	895,05 m²	895,05 m²
Flexi	4	4	4	4	4	4

Tabelle 8-1: Ergebnisse Optimierung nach Herstellkosten

#### Lösung Ortbeton:

Die Konstruktion besteht aus einer einachsigen gespannten Betondecke ( $d = 20$  cm) auf Unterzügen in Gebäudequerrichtung. Die Unterzüge sind jeweils auf vier Stützen gelagert, wobei die Außenstütze im Innenraum und die Innenstütze auf der anderen Flurseite, am äußeren Rand der Gemeinschaftszone angeordnet ist. Infolge der Durchlaufwirkung der Unterzüge wird durch die Anordnung eines Kragarms eine günstige Momentenverteilung erreicht, die zu einer wirtschaftlichen Lösung der Unterzüge führt. Das Konstruktionsraster in Gebäudelängsrichtung ist in vier Felder mit 4,80 m Spannweite eingeteilt. Es wird eine Installationsführung gewählt, die nicht im Fußboden verlegt ist und unter der Deckenkonstruktion keine zusätzliche Höhe benötigt. Dadurch kann der Fußboden mit einer minimalen Höhe von 10 cm als Estrichfußboden ausgeführt werden. Da durch den geringen Querschnitt der Unterzüge ( $b/d=30/35$  cm) eine lichte Durchgangshöhe von mindestens 2,50 m gewährleistet ist und die geforderte lichte Raumhöhe von 2,80 m nicht erhöht werden muss, wird die kleinste mögliche Geschosshöhe von 3,10 m maßgebend.

#### Lösung Stahlverbund:

Die Geometrie des Grundmoduls entspricht in Länge und Breite der Geometrie der Ortbetonlösung. Der Unterschied liegt allein in der Wahl des Konstruktionsrasters. Infolge der Variation der Kosten des Profilstahls ergeben sich zwei unterschiedliche Lösungen für die Verbundbauweise. Beide Lösungen bestehen aus vier Stützenreihen in Gebäudequerrichtung. Die Außenstützen sind an der Fassadeninnenseite angeordnet, und die Innenstützen stehen wie bei der Lösung in Ortbeton am äußeren Rand der Gemeinschaftszone. Bei geringen Kosten für den Profilstahl sind die Herstellkosten bei Geometrie 1 geringer als bei Geometrie 2. Mit steigenden Kosten des Profilstahls wird Geometrie 2 günstiger als Geometrie 1.

- Geometrie 1 (Geo-1-1):  
Es werden im Abstand von 2,40 m Verbundträger in Gebäudequerrichtung angeordnet, über die eine Verbunddecke mit 10 cm Höhe spannt. Diese hohe Anzahl von Trägern und Stützen führt zu einer minimalen Geschosshöhe von 3,00 m. Durch die geringe Geschosshöhe können die Ausbaukosten (im Wesentlichen die Trennwände und die Fassade) gering gehalten werden, was somit auch zu geringen Herstellkosten führt. Die Stellung der Außenstützen wird an der Innenseite der Außenfassade gewählt. Durch die geringen Spannweiten können schlanke Trägerquerschnitte verwendet werden. Es kann ebenfalls auf eine Montageunterstützung verzichtet werden. Der Nachteil dieser Tragwerkslösung sind zwei sehr dichte Stützenreihen am Rand der Gemeinschaftszone, was die Nutzbarkeit dieser Zone einschränkt. Die Flurbreite wird so klein wie möglich gewählt, da diese einen direkten Einfluss auf die Gebäudebreite und somit auf die Herstellkosten hat. Die geometrischen Ergebnisse sind plausibel und nachvollziehbar.
- Geometrie 2 (Geo-1-2):  
Im Gegensatz zu Geometrie 1 wird ein System mit kurzen Randfeldern (2,40 m) und größeren Innenfeldern (4,80 m) gewählt. Infolge der größeren Spannweite wird eine einachsig in Gebäudelängsrichtung gespannte Ortbetondecke gewählt. Das bedeutet, dass sich Verbunddecken aus Holorib-Bleichen bei einer Spannweite von 4,80 m nicht mehr lohnen. Durch die Verwendung einer Massivdecke vergrößert sich aber die Geschosshöhe gegenüber Geometrie 1. Die Anordnung der Außen- und der Innenstütze, die Breite des Flures sowie die Ausbildung und Montage des Verbundträgers sind aus den oben angeführten Gründen wie bei Geometrie 1 gewählt.

#### Beurteilung:

In Abbildung 8-1 sind die Herstellkosten von zwei Ortbetonlösungen und verschiedenen Verbundlösungen in Abhängigkeit der Profilstahlkosten dargestellt. Die Ortbetonlösungen sind unabhängig von den Profilstahlkosten und daher konstant.

Es ist erkennbar, dass die Verbundlösungen (Geo-1-1 und Geo-1-2) für die Variation 1 und 2 der Profilkosten geringere Herstellkosten als die Ortbetonlösung (Geo-a) haben. Ab Variation 3 sind die Herstellkosten der Ortbetonlösung geringer als die der Verbundlösungen.

Trotz der günstigeren Herstellkosten ist es bemerkenswert, dass die Rohbaukosten der beiden Verbundlösungen (Geo-1-2 erst ab Variation 2) teurer sind als die Rohbaukosten der Ortbetonlösung (siehe Abbildung 8-2). Infolge des oben angesprochenen Nachteils der vielen Innenstützen bei Geometrie 1 ist die Verbundlösung nach Geometrie 2 für das Kriterium der minimalen Herstellkosten eine wirtschaftliche Alternative (siehe auch Abbildung 8-1).

Es wird weiterhin festgestellt, dass die Geschosshöhe und somit die Gebäudehöhe bei der Verbundbauweise geringer ist. Daraus lässt sich schließen, dass die Minimierung der Geschosshöhe eine weitere Möglichkeit darstellt, die Herstellkosten zu senken.

In Tabelle 8-2 sind die einzelnen Kosten der Ergebnisse (Geo-a) und (Geo-1-1) für die Variation 2 der Profilstahlkosten aufgelistet. Die Verbundlösung ist im Rohbau ca. 20.000 DM teurer, ist aber durch ein geringeres Volumen in den Ausbaukosten um ca. 30.000 DM billiger. Somit verbleibt eine Differenz von knapp 10.000 DM, die die Verbundbauweise günstiger ist als die Ortbetonbauweise. Bei Anwendung einer Verbundkonstruktion kann eine geringe Geschosshöhe erreicht werden, die zu geringeren Ausbaukosten führt und unter Umständen die erhöhten Rohbaukosten kompensiert.

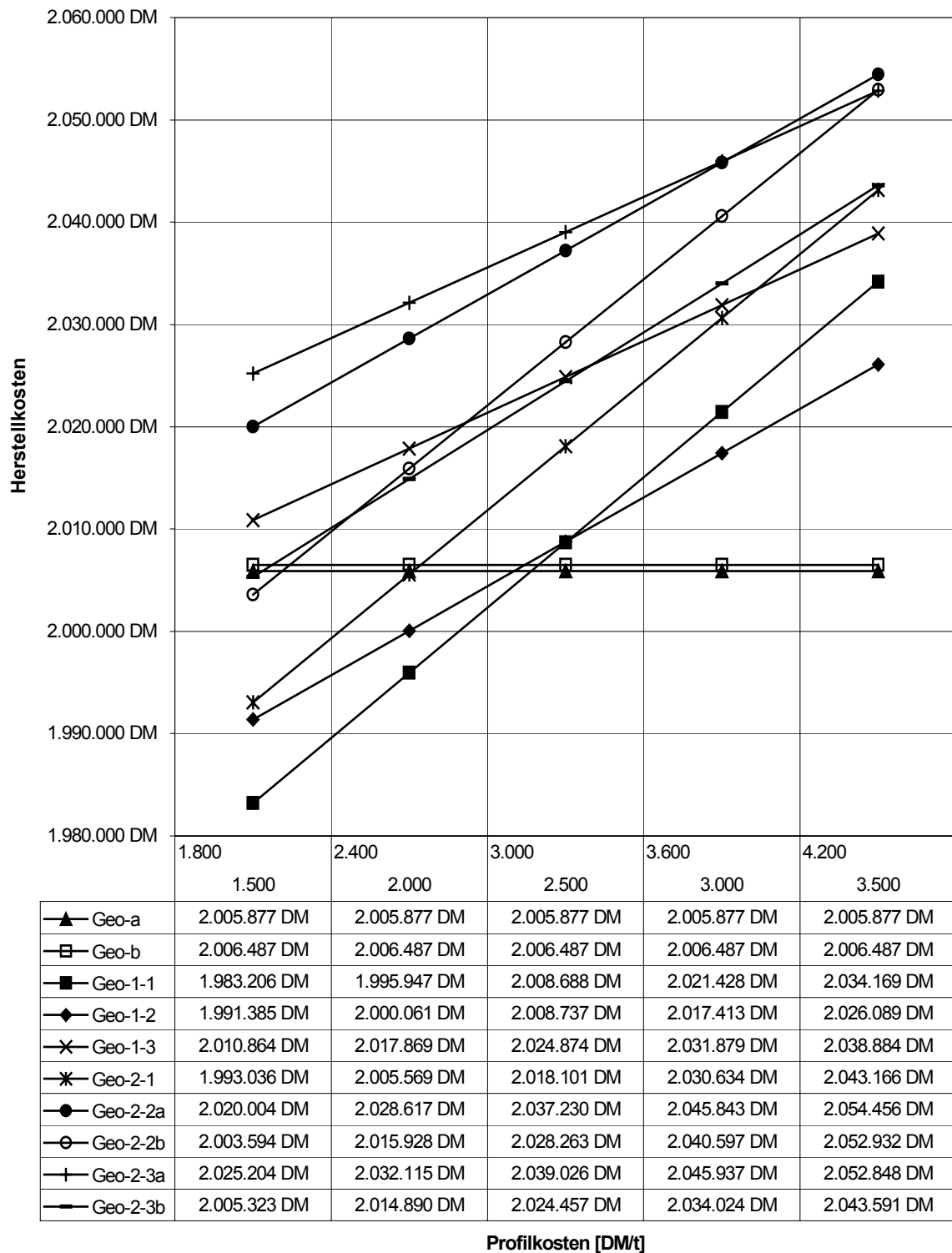


Abbildung 8-1: Herstellkosten in Abhängigkeit von Geometrie und Profilstahlkosten

Variation 2	Geo-a	Geo-1-1	(Geo-1-1) - (Geo-a)
Herstellkosten	2.005.877 DM	1.995.947 DM	- 9.930 DM
Rohbaukosten	222.032 DM	241.957 DM	19.925 DM
Profilgewicht V-Träger [kg]		13.303	
Kosten Verbundträger [DM/t]		2.000	
		26.606 DM	
Profilgewicht V-Stütze [kg]		10.148	
Kosten Verbundstütze [DM/t]		2.400	
		24.355 DM	
Kosten Profilstahl		50.961 DM	
Kosten Rohbau (Rest)		190.996 DM	
Geschoßhöhe [m]	3,10	3,00	
BRI [m³]	2.774,66	2.685,15	
Ausbaukosten	1.783.845 DM	1.753.990 DM	- 29.855 DM
Gesamtdifferenz			- 9.930 DM

Tabelle 8-2: Unterschiede Geo-a und Geo-1-1

Wichtig ist in diesem Zusammenhang, dass die Fassadenkosten und die Kosten der Trennwand direkt von der Geschoss- bzw. Gebäudehöhe abhängen. Somit wird die Einsparung der Ausbauposten infolge einer geringeren Geschosshöhe auch durch die Einheitspreise von Fassade und Trennwandsystem beeinflusst. Die grundsätzliche Aussage, dass durch eine geringe Geschosshöhe die Ausbauposten reduziert werden, ist immer richtig. Ob die Einsparungen allerdings höhere Rohbaukosten kompensieren können, ist von den Ausführungsstandards von Fassade und Trennwandsystem und den zugehörigen Einheitspreisen abhängig.

In Abbildung 8-1 ist auch erkennbar, dass bei steigenden Profilstahlkosten ein Geometriewechsel bei den Verbundlösungen stattfindet. (Geo-1-2) weist ab Variation 4 geringere Herstellkosten als Lösung (Geo-1-1) auf. Die Herstellkosten von (Geo-1-1) steigen bei Erhöhung der Profilstahlkosten schneller an als bei (Geo-1-2). Da bei (Geo-1-1) mehr Profilstahl benötigt wird als bei (Geo-1-2), liegt die Vermutung nahe, dass die Menge des Profilstahls eine Auswirkung auf die Wahl der Geometrie hat. Die Differenz der Rohbaukosten wird zu 82% durch die Kosten des Profilstahls bestimmt. Daher sind die wesentlichen Vergleichskriterien der beiden Lösungen die Profilkosten und die Ausbauposten

Variation 4	Geo-1-1	Geo-1-2	(Geo-1-2) - (Geo-1-1)
Herstellkosten	2.021.428 DM	2.017.413 DM	- 4.015 DM
Rohbaukosten	267.438 DM	239.507 DM	- 27.931 DM
Profilgewicht V-Träger [kg]	13.303	7.602	-5.701
Kosten Verbundträger [DM/t]	3.000	3.000	
	39.909 DM	22.806 DM	
Profilgewicht V-Stütze [kg]	10.148	8.125	-2.023
Kosten Verbundstütze [DM/t]	3.600	3.600	
	36.533 DM	29.250 DM	
Kosten Profilstahl	76.442 DM	52.056 DM	-24.386
Kosten Rohbau (Rest)	190.996 DM	187.451 DM	-3.545
Geschoßhöhe [m]	3,00	3,08	
BRI [m³]	2.685,15	2.756,75	
Ausbaukosten	1.753.990 DM	1.777.906 DM	23.916 DM
Gesamtdifferenz			- 4.015 DM

Tabelle 8-3: Unterschiede (Geo-1-1) und (Geo-1-2)

Aus dieser Überlegung heraus wird folgender Satz für den Vergleich zweier Verbundlösungen mit ähnlichen Herstellkosten abgeleitet:

Solange die Kosten aus dem Mehrverbrauch an Profilstahl geringer sind als die Kosten einer größeren Gebäudehöhe, ist eine Lösung mit mehr Profilstahl und geringer Geschosshöhe günstiger als eine Lösung mit weniger Profilstahl und größerer Geschosshöhe.

### 8.2.2 Optimierung 2 (min. Rohbaukosten)

Die Ergebnisse der Optimierung nach Rohbaukosten sind in nachfolgender Tabelle zusammengestellt.

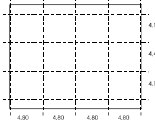
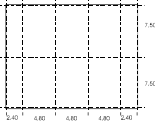
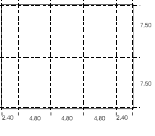
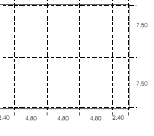
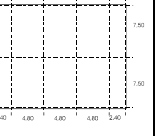
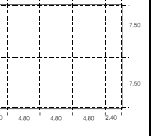
	Ortbeton	Verbund				
Geometrie	Geo-a	Geo-2-3a	Geo-2-3a	Geo-2-3a	Geo-2-3a	Geo-2-3a
Variation		1	2	3	4	5
Profilträger		1500 DM/t	2000 DM/t	2500 DM/t	3000 DM/t	3500 DM/t
Profilstütze		1800 DM/t	2400 DM/t	3000 DM/t	3600 DM/t	4200 DM/t
Grundriss						
KHerstell	2.005.877 DM	2.025.204 DM	2.032.115 DM	2.039.026 DM	2.045.937 DM	2.052.848 DM
KRohbau	222.032 DM	203.410 DM	210.321 DM	217.232 DM	224.144 DM	231.055 DM
KAusbau	1.783.845 DM	1.821.794 DM	1.821.794 DM	1.821.794 DM	1.821.794 DM	1.821.794 DM
Hg	3,10 m	3,16 m	3,16 m	3,16 m	3,16 m	3,16 m
BRI	2.774,66 m³	2828,36 m³	2828,36 m³	2828,36 m³	2828,36 m³	2828,36 m³
BGF	895,05 m²	895,05 m²	895,05 m²	895,05 m²	895,05 m²	895,05 m²
Flexi	4	5	5	5	5	5

Tabelle 8-4: Ergebnisse Optimierung nach Rohbaukosten

#### Lösung Ortbeton:

Die hier berechnete Lösung ist identisch mit der Lösung bei minimalen Herstellkosten (vgl. Kapitel 8.2.1).

#### Lösung Stahlverbundbau:

Im Gegensatz zur Lösung bei minimalen Herstellkosten wird hier eine andere Tragwerkstruktur berechnet. Der Querschnitt besteht aus drei Stützenreihen, wobei die Außenstützen an der Fassadeninnenseite und die Innenstützen mittig in der Gemeinschaftszone angeordnet sind. Die Träger spannen über 7,50 m in Gebäudequerrichtung. Damit schlanke Profilquerschnitte (IPE 300) verwendet werden können, sind bei der vorhandenen Spannweite Montagestützen im Bauzustand notwendig. Die Deckenkonstruktion ist als einachsig gespannte Ortbetondecke mit einer Spannweite von 4,80 m ausgeführt. Die Flurbreite wird so klein wie möglich gewählt.

#### Beurteilung:

Im Gegensatz zur Optimierung 1 wird eine Verbundkonstruktion mit einem geringen Anteil an Profilstahl vorgeschlagen. Weil sich die Geometrie der Verbundlösung bei Veränderung der Profilstahlkosten nicht ändert, besteht ein linearer Zusammenhang zwischen den Kosten und der Menge des Profilstahls (siehe Abbildung 8-2).



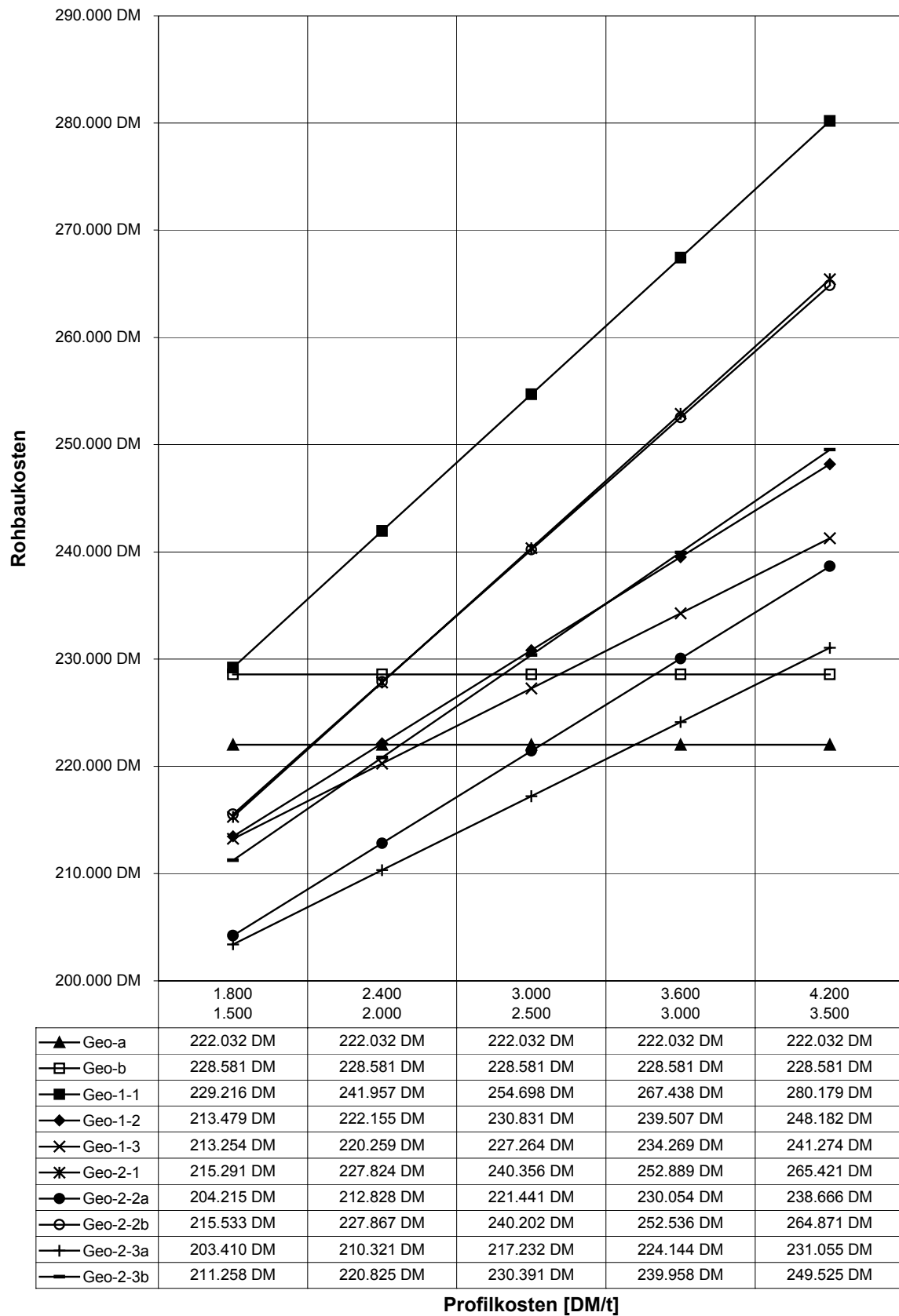


Abbildung 8-2: Rohbaukosten in Abhängigkeit von Geometrie und Profilstahlkosten

Variation 2	Geo-a	Geo-2-3a	(Geo-2-3a) - (Geo-a)
Herstellkosten	2.005.877 DM	2.032.115 DM	26.238 DM
Rohbaukosten	222.032 DM	210.321 DM	- 11.711 DM
Profilgewicht V-Träger [kg]		6.799	
Kosten Verbundträger [DM/t]		2.000	
		13.598 DM	
Profilgewicht V-Stütze [kg]		5.853	
Kosten Verbundstütze [DM/t]		2.400	
		14.047 DM	
Kosten Profilstahl		27.645 DM	
Kosten Rohbau (Rest)	222.032 DM	182.676 DM	- 39.356 DM
Geschoßhöhe [m]	3,10	3,16	
BRI [m³]	2.774,66	2828,36	
Ausbaukosten	1.783.845 DM	1.821.794 DM	37.949 DM
Gesamtdifferenz			26.238 DM

Tabelle 8-5: Unterschiede Geo-a und Geo-2-3a

Der Vergleich des Verbrauchs an Profilstahl für die Lösungen (Geo-2-3a) aus Optimierung 2 und den Lösungen (Geo-1-1) und (Geo-1-2) aus Optimierung 1 zeigt, dass die Lösung (Geo-2-3a) vor der Lösung (Geo-1-2) den geringsten Verbrauch an Profilstahl hat. Wichtig erscheint hier die Erkenntnis, dass die Minimierung der Rohbaukosten bei den Verbundkonstruktionen über die Minimierung der Profilstahlkosten und damit über die Minimierung des Profilgewichts erreicht werden kann.

Gewicht Profilstahl	Geo-1-1	Geo-1-2	Geo-2-3a
Träger	13.303 kg	7.602 kg	6.799 kg
Stützen	10.148 kg	8.125 kg	5.853 kg
Summe	23.451 kg	15.727 kg	12.652 kg

Tabelle 8-6: Unterschiede Stahlverbrauch Lösung Geo-1-1, Geo-1-2 und Geo-2-3a

Eine Verbundlösung mit geringem Profilgewicht hat aber den Nachteil, dass der minimierte Verbrauch an Profilstahl eine größere Geschosshöhe nach sich zieht. Dadurch werden die Vorteile der minimalen Rohbaukosten durch die Nachteile der höheren Ausbaukosten bei einer Betrachtung der gesamten Herstellkosten wirkungslos.

### 8.2.3 Optimierung 3 (min. Nutzungskosten)

Die Ergebnisse der Optimierung nach den minimalen Nutzungskosten sind in Tabelle 8-7 zusammengestellt. Sie entsprechen den Ergebnissen der Optimierung nach den Herstellkosten. Dies liegt daran, dass sich die Nutzungskosten aus Kapitalkosten, Reinigungskosten und Energiekosten zusammensetzen, wobei die Kapitalkosten, die direkt von den Herstellkosten abhängen, den größten und entscheidenden Teil einnehmen.

Die Reinigungskosten sind von der BGF abhängig, die bei allen Lösungen gleich ist. Die BGF wird über die Anzahl der Standardbüros, über die Anzahl der Arbeitsplätze und über die Fläche pro Arbeitsplatz eindeutig vorgegeben. Somit haben die Reinigungskosten keinen Einfluss auf die Minimierung der Nutzungskosten.

Die Energiekosten hängen u. a. vom BRI ab und variieren abhängig von der berechneten Lösung. Da die Energiekosten nur zu etwa 3,20 % in den Nutzungskosten enthalten sind, können diese Einflüsse vernachlässigt werden. Das bedeutet auch, dass die Energiekosten unter den gegebenen Voraussetzungen nur einen sehr geringen Einfluss auf den Gebäudeentwurf haben. Somit sind die Kapitalkosten, die mit ungefähr 79% der Nutzungskosten den größten Anteil einnehmen, für die Minimierung der Nutzungskosten verantwortlich. Da sich die Kapitalkosten proportional zu den Herstellkosten verändern, sind die gleichen Ergebnisse wie bei Optimierung 1 logisch nachvollziehbar.

In Abbildung 8-3 sind die Nutzungskosten der einzelnen Lösungen in Abhängigkeit der Profilstahlkosten aufgetragen. Man erkennt die ähnliche Verteilung der Kurven wie bei Abbildung 8-1.

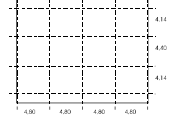
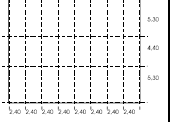
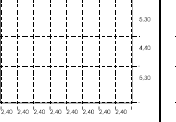
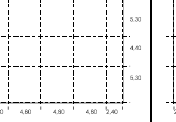
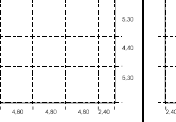
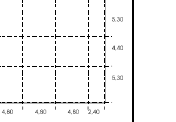
	Ortbeton	Verbund				
Geometrie	Geo-a	Geo-1-1	Geo-1-1	Geo-1-2	Geo-1-2	Geo-1-2
Variation		1	2	3	4	5
Profilträger		1500 DM/t	2000 DM/t	2500 DM/t	3000 DM/t	3500 DM/t
Profilstütze		1800 DM/t	2400 DM/t	3000 DM/t	3600 DM/t	4200 DM/t
Grundriss						
KKapital	164.445 DM	162.586 DM	163.631 DM	164.679 DM	165.390 DM	166.102 DM
KReinigung	37.217 DM	37.128 DM	37.128 DM	37.199 DM	37.199 DM	37.199 DM
KEnergie	6.667 DM	6.554 DM	6.554 DM	6.644 DM	6.644 DM	6.644 DM
KNutzung	208.328 DM	206.269 DM	207.313 DM	208.522 DM	209.234 DM	209.945 DM
KKapital	78,94%	78,82%	78,93%	78,97%	79,05%	79,12%
KReinigung	17,86%	18,00%	17,91%	17,84%	17,78%	17,72%
KEnergie	3,20%	3,18%	3,16%	3,19%	3,17%	3,16%
KNutzung	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
BRI	2.774,66 m³	2685,15 m³	2685,15 m³	2.756,75 m³	2.756,75 m³	2.756,75 m³
BGF	895,05 m²	895,05 m²	895,05 m²	895,05 m²	895,05 m²	895,05 m²

Tabelle 8-7: Ergebnisse Optimierung nach Nutzungskosten

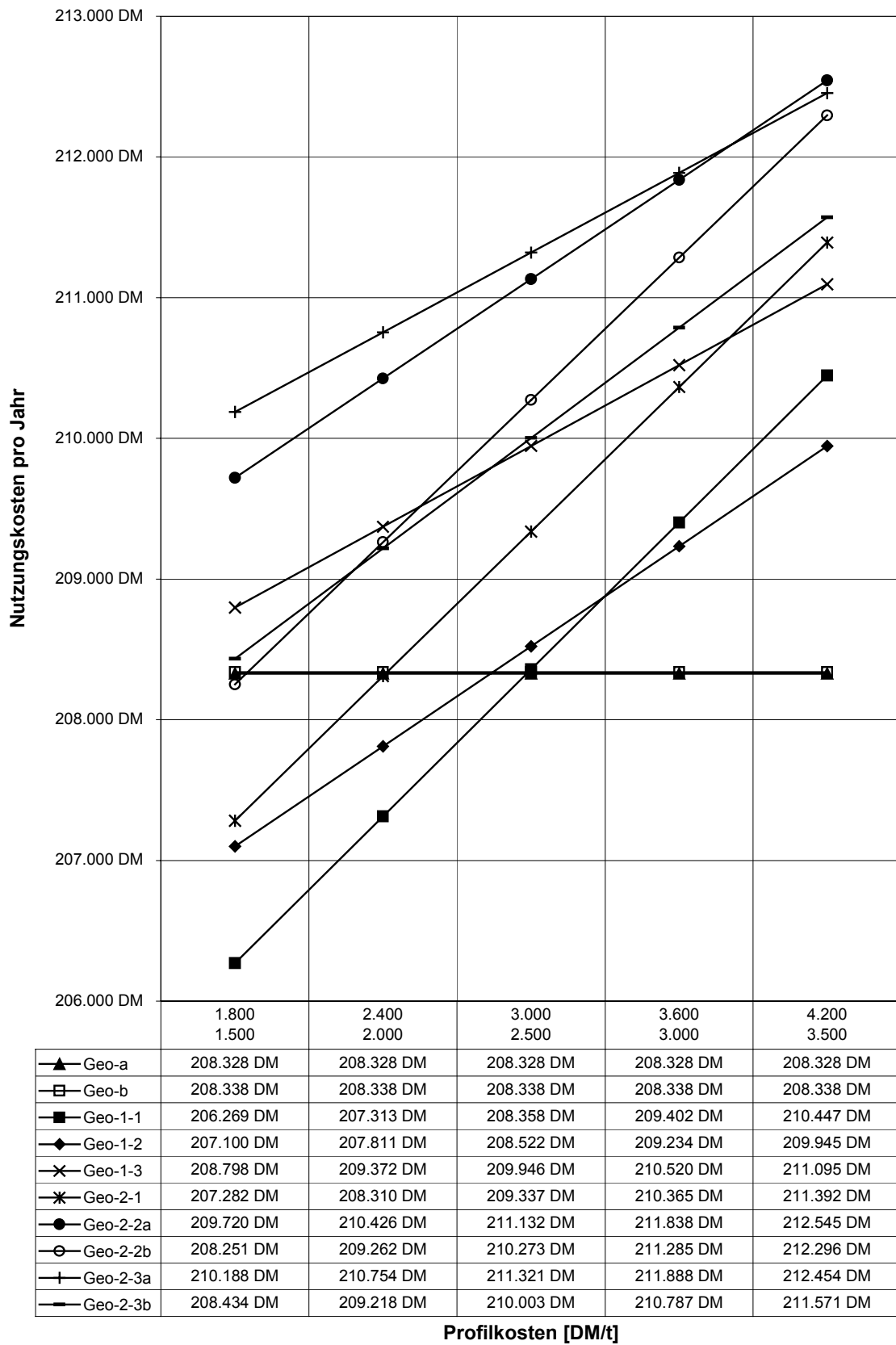
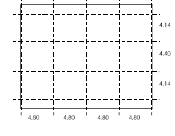
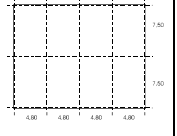
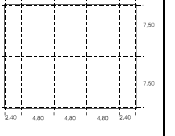
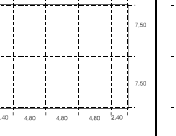
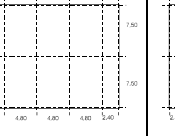
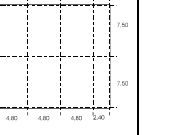


Abbildung 8-3: Nutzungskosten in Abhängigkeit von Geometrie und Profilstahlkosten

### 8.2.4 Optimierung 4 (min. Herstellkosten + min. Rohbaukosten)

	Ortbeton	Verbund				
Geometrie	Geo-a	Geo-2-2a	Geo-2-3a	Geo-2-3a	Geo-2-3a	Geo-2-3a
Variation		1	2	3	4	5
Profilträger		1500 DM/t	2000 DM/t	2500 DM/t	3000 DM/t	3500 DM/t
Profilstütze		1800 DM/t	2400 DM/t	3000 DM/t	3600 DM/t	4200 DM/t
Grundriss						
KHerstell	2.005.877 DM	2.020.004 DM	2.032.115 DM	2.039.026 DM	2.045.937 DM	2.052.848 DM
KRohbau	222.032 DM	204.215 DM	210.321 DM	217.232 DM	224.144 DM	231.055 DM
KAusbau	1.783.845 DM	1.815.789 DM	1.821.794 DM	1.821.794 DM	1.821.794 DM	1.821.794 DM
Hg	3,10 m	3,14 m	3,16 m	3,16 m	3,16 m	3,16 m
BRI	2.774,66 m³	2810,46 m³	2828,36 m³	2828,36 m³	2828,36 m³	2828,36 m³
BGF	895,05 m²	895,05 m²	895,05 m²	895,05 m²	895,05 m²	895,05 m²
Flexi	4	5	5	5	5	5

**Tabelle 8-8: Ergebnisse Optimierung nach Herstell- und Rohbaukosten**

Die hier berechnete Lösung in Ortbeton ist identisch mit der Lösung bei minimalen Herstellkosten (vgl. Kapitel 8.2.1). Bei den Verbundlösungen findet zwischen Variation 1 und 2 ein Geometriewechsel statt. Die Parameter der Lösung (Geo-2-2) sind bis auf die Längsgeometrie, zwei kleinere Randfelder anstatt gleicher Spannweiten, identisch mit den Parametern der Lösung (Geo-2-3a). Für die Profilkosten der Variation 1 sind bei Lösung (Geo-2-2a) die Einsparungen an den Ausbaukosten, infolge einer um 2 cm geringeren Geschosshöhe, größer als die etwas teureren Rohbaukosten. Ab Variation 2 können die Vorteile der geringen Geschosshöhe nicht mehr die erhöhten Rohbaukosten kompensieren, so dass dann die Fitnesswerte der Lösung (Geo-2-3a) höher sind als bei Lösung (Geo-2-2a).

#### Beurteilung:

Aus den obigen Ergebnissen kann man ableiten, dass bei gleichzeitiger Forderung nach minimalen Herstell- und minimalen Rohbaukosten und bei gleichwertiger Gewichtung der beiden Kriterien eine Verbundlösung mit geringen Rohbaukosten ermittelt wird. Das wiederum bedeutet, dass die Rohbaukosten bei dieser Kombination sehr stark dominieren. Es stellt sich für den Verbundbau natürlich die Frage, ob diese gleichwertigen Anforderungen überhaupt sinnvoll sind. In Kapitel 8.2.1 werden Verbundlösungen ermittelt, die geringere Herstellkosten als vergleichbare Ortbetonlösungen haben, bei den Rohbaukosten jedoch teurer sind. Der Vorteil der Verbundlösung liegt in der Einsparung der Geschosshöhe, der allerdings mit höheren Rohbaukosten bezahlt werden muss. Aus dieser Sichtweise heraus ist eine Kombination von minimalen Herstell- und Rohbaukosten nicht sinnvoll, um daraus Chancen für die Verbundbauweise abzuleiten.

Eine Auswertung der Fitnesswerte der verschiedenen geometrischen Lösungen ist in Abbildung 8-4 dargestellt. Hierbei sind die Lösungen mit dem höchsten Fitnesswert die besten.

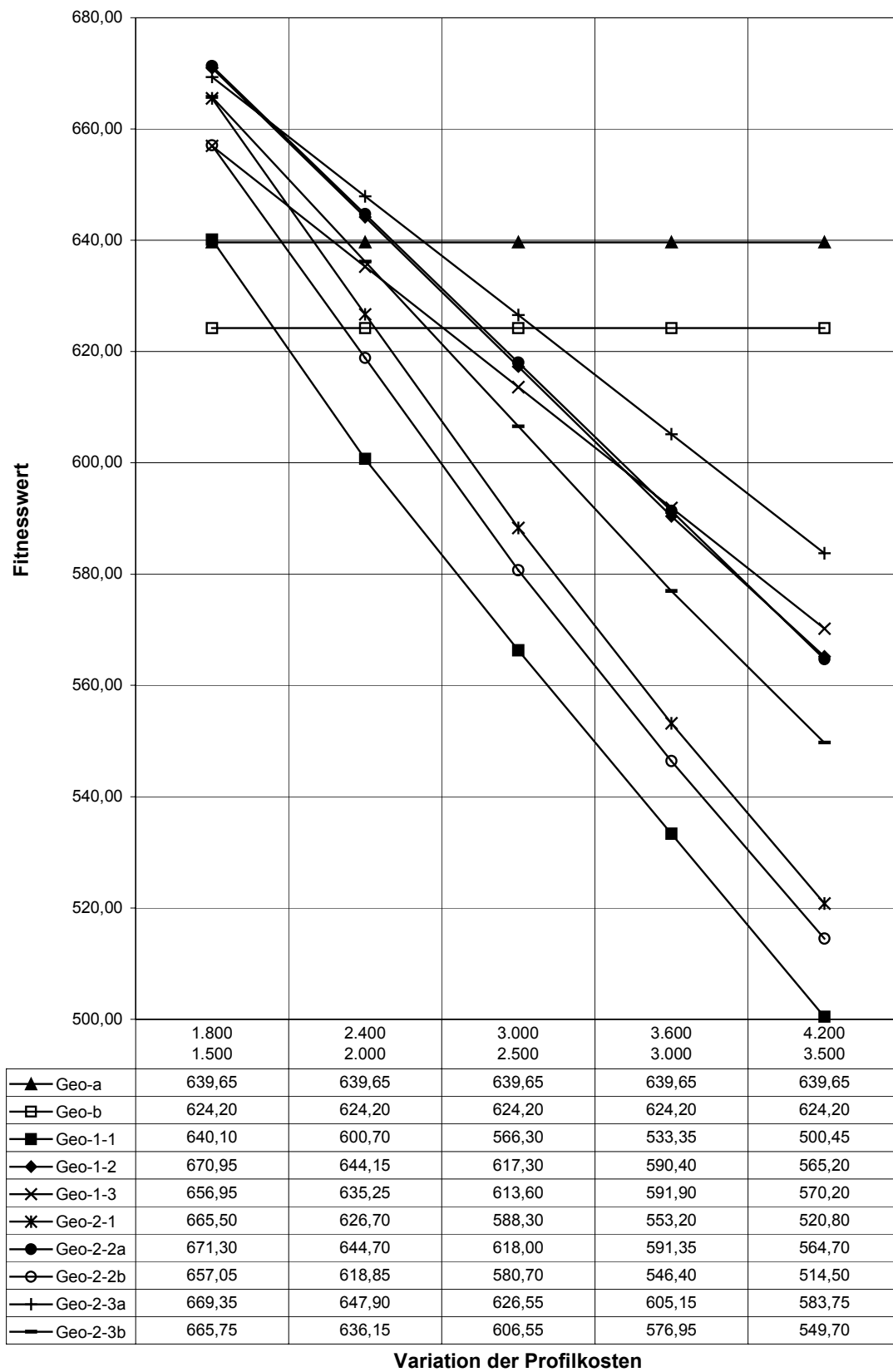


Abbildung 8-4: Fitnesswerte der Kombination Herstell- und Rohbaukosten



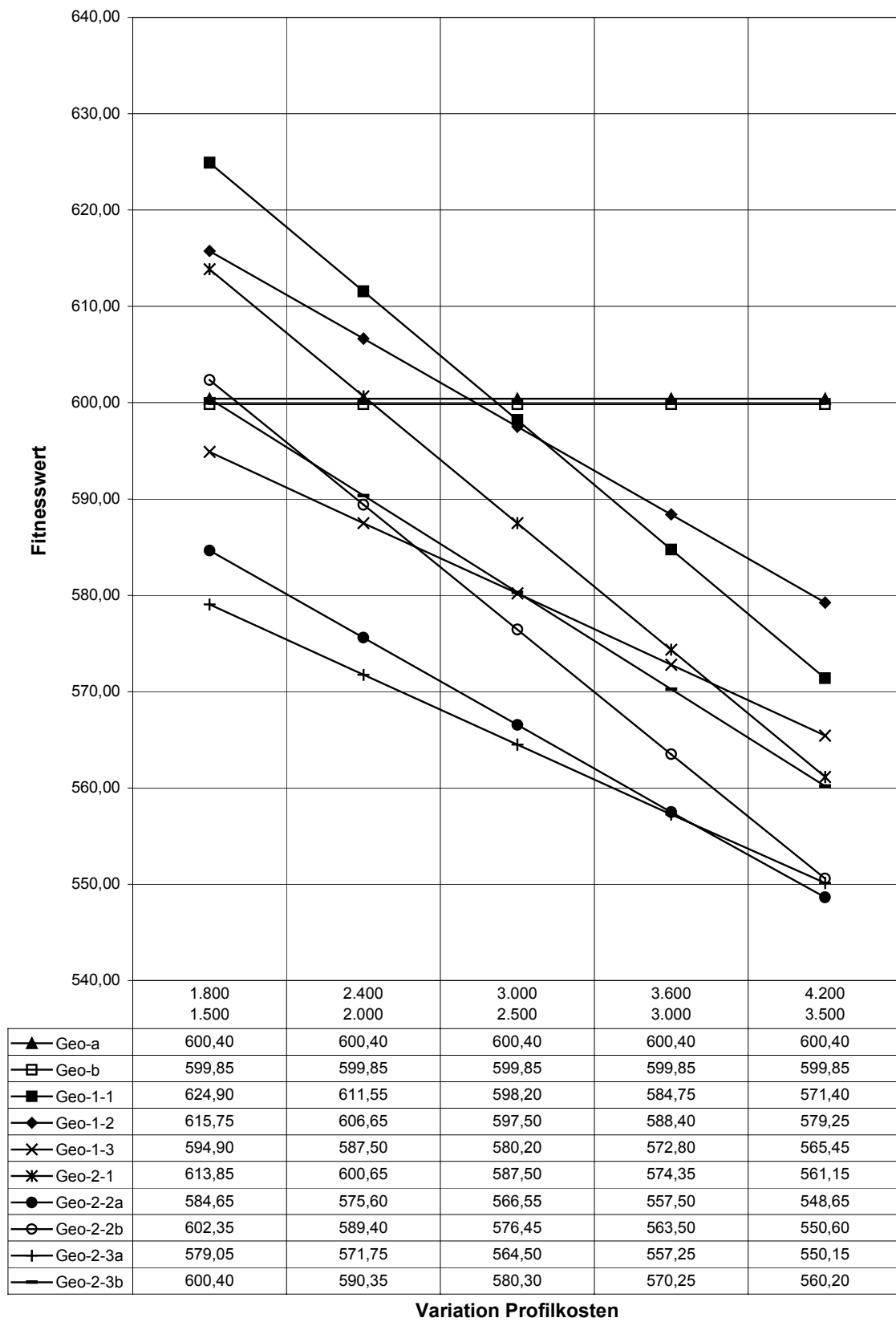


Abbildung 8-5: Fitnesswerte Kombination Herstell- (gew=5) und Nutzungskosten (gew=5)



### 8.2.6 Optimierung 6 (min. Rohbaukosten + min. Nutzungskosten)

Die Ergebnisse der Optimierung nach der Kombination von Rohbau- und Nutzungskosten sind in nachfolgender Tabelle zusammengestellt. Beide Kriterien wurden bei der Berechnung gleich gewichtet.

	Ortbeton	Verbund				
Geometrie	Geo-a	Geo-2-3a	Geo-2-3a	Geo-2-3a	Geo-2-3a	Geo-2-3a
Variation		1	2	3	4	5
Profilträger		1500 DM/t	2000 DM/t	2500 DM/t	3000 DM/t	3500 DM/t
Profilstütze		1800 DM/t	2400 DM/t	3000 DM/t	3600 DM/t	4200 DM/t
Grundriss						
KHerstell	2.005.877 DM	2.025.204 DM	2.032.115 DM	2.039.026 DM	2.045.937 DM	2.052.848 DM
KRohbau	222.032 DM	203.410 DM	210.321 DM	217.232 DM	224.144 DM	231.055 DM
KAusbau	1.783.845 DM	1.821.794 DM	1.821.794 DM	1.821.794 DM	1.821.794 DM	1.821.794 DM
KKapital	164.445 DM	166.029 DM	166.596 DM	167.162 DM	167.729 DM	168.296 DM
KReinigung	37.217 DM	37.424 DM	37.424 DM	37.424 DM	37.424 DM	37.424 DM
KEnergie	6.667 DM	6.735 DM	6.735 DM	6.735 DM	6.735 DM	6.735 DM
KNutzung	208.328 DM	210.188 DM	210.754 DM	211.321 DM	211.888 DM	212.454 DM
Hg	3,10 m	3,16 m	3,16 m	3,16 m	3,16 m	3,16 m
BRI	2.774,66 m³	2828,36 m³	2828,36 m³	2828,36 m³	2828,36 m³	2828,36 m³
BGF	895,05 m²	895,05 m²	895,05 m²	895,05 m²	895,05 m²	895,05 m²
Flexi	4	5	5	5	5	5

Tabelle 8-10: Ergebnisse Optimierung nach min. Rohbau- und min. Nutzungskosten

Die hier berechnete Lösung in Ortbeton ist identisch mit der Lösung bei minimalen Herstellkosten (vgl. Kapitel 8.2.1). Die Verbundlösungen sind identisch mit den Lösungen bei minimalen Rohbaukosten (vgl. Kapitel 8.2.2).

#### Beurteilung:

Infolge der gleichmäßigen Gewichtung der beiden Bewertungskriterien (siehe Abbildung 8-6) überwiegt der Einfluss der Rohbaukosten bei der Ermittlung des Fitnesswertes. Aus diesem Grund werden die gleichen Lösungen ermittelt wie bei der Optimierung allein nach den Rohbaukosten.

Bei einer Veränderung der Gewichtung, bei der die Rohbaukosten zu 30% und die Nutzungskosten zu 70% in den Fitnesswert eingerechnet werden, bleibt das Ergebnis im wesentlichen gleich. Lediglich bei den minimal angenommenen Profilstahlkosten von 1500 DM/t für Verbundträger und 1800 DM/t für Verbundstützen, sind die Fitnesswerte der Lösungen (Geo-1-2) und (Geo-2-1) besser als bei Lösung (Geo-2-3a). Dies liegt daran, dass diese Lösungen geringere Nutzungskosten haben, die infolge der Gewichtungsverteilung den Fitnesswert sehr stark beeinflussen.

Aus diesem Vergleich der Gewichtung lässt sich schließen, dass bei einer Kombination von Rohbau- und Nutzungskosten die Rohbaukosten einen starken Einfluss auf das Ergebnis haben und daher die Minimierung der Rohbaukosten maßgebend für das Ergebnis ist.

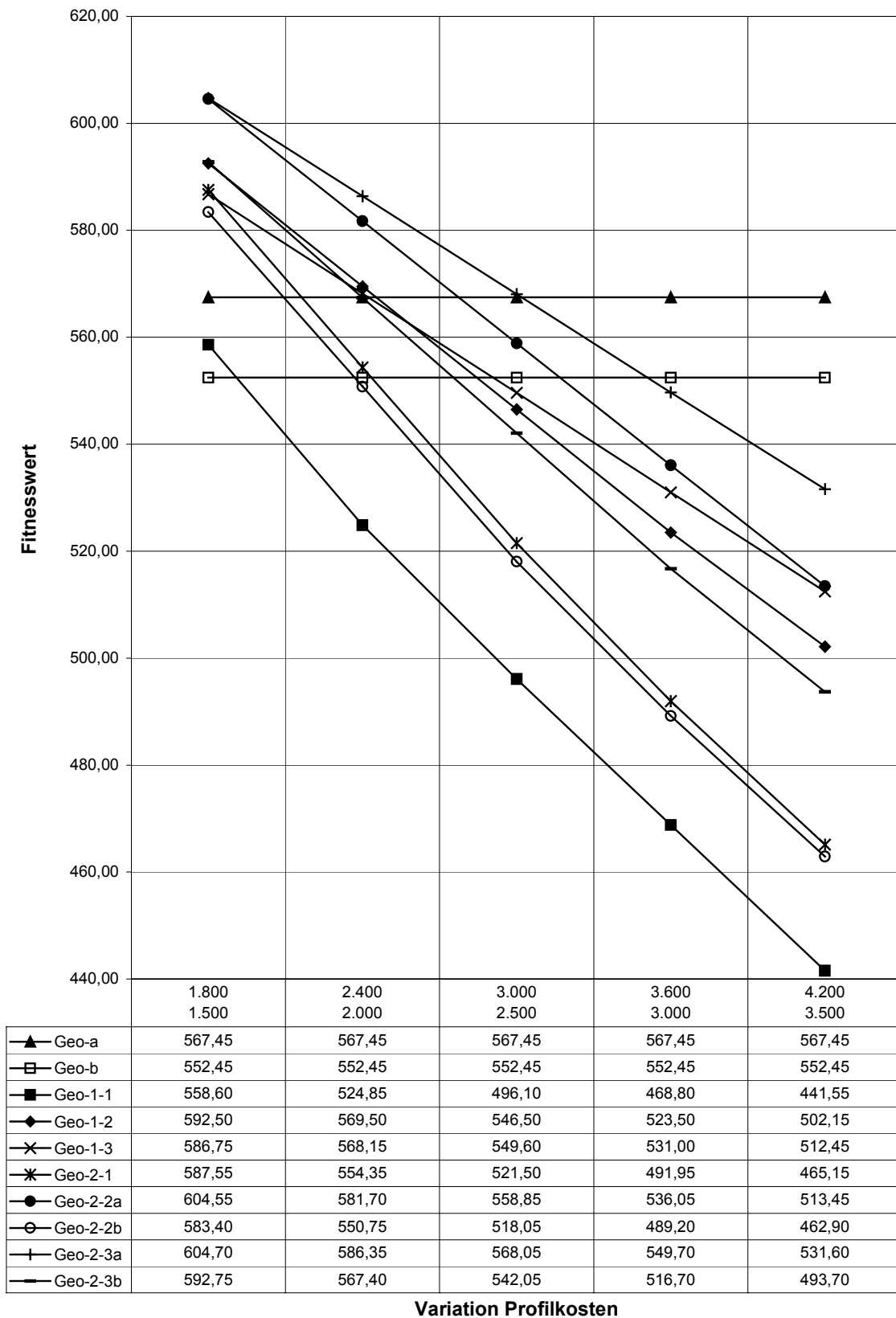


Abbildung 8-6: Fitnesswerte Kombination Rohbau- (gew=5) und Nutzungskosten (gew=5)



### 8.2.7 Optimierung 7 (min. Herstellkosten + min. BRI)

Die verschiedenen BRI sind in Abhängigkeit der unterschiedlichen Geometrien in nachfolgender Abbildung dargestellt.

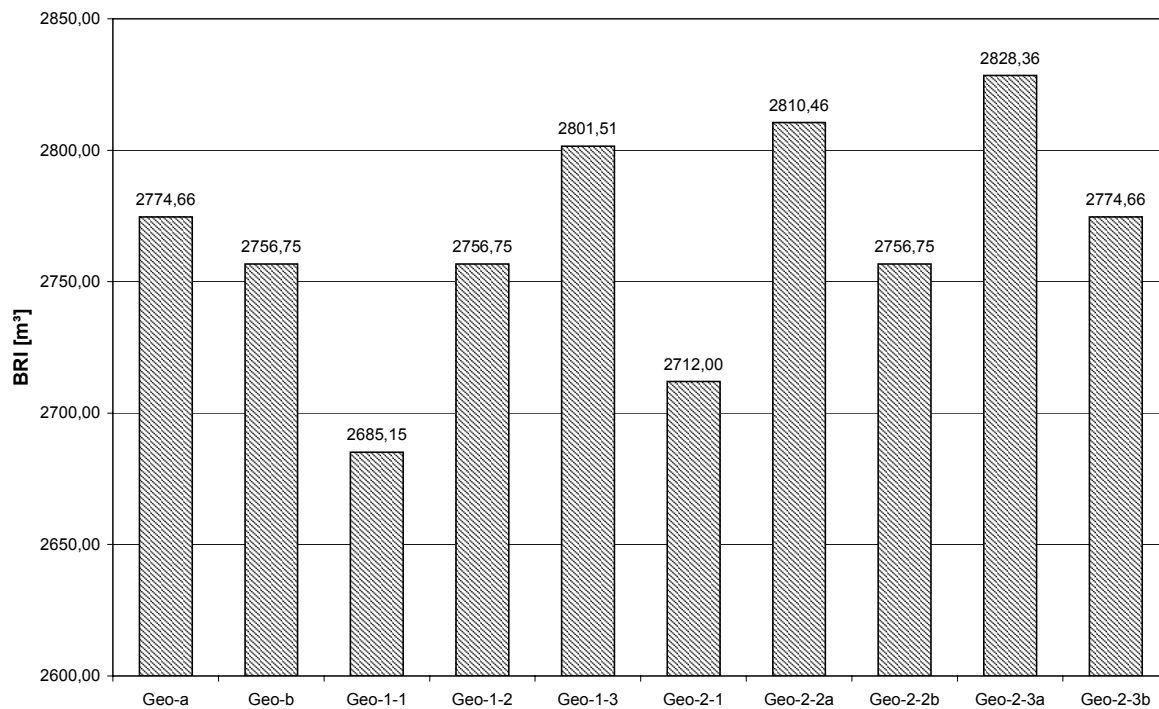


Abbildung 8-8: BRI in Abhängigkeit der Geometrie

Die Ergebnisse der Optimierung nach minimalen Herstellkosten und minimalem BRI sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt:

	Ortbeton	Verbund				
Geometrie	Geo-b	Geo-1-1	Geo-1-1	Geo-1-1	Geo-1-1	Geo-1-1
Variation		1	2	3	4	5
Profilträger		1500 DM/t	2000 DM/t	2500 DM/t	3000 DM/t	3500 DM/t
Profilstütze		1800 DM/t	2400 DM/t	3000 DM/t	3600 DM/t	4200 DM/t
Grundriss						
KHerstell	2.006.487 DM	1.983.206 DM	1.995.947 DM	2.008.688 DM	2.021.428 DM	2.034.169 DM
KRohbau	228.581 DM	229.216 DM	241.957 DM	254.698 DM	267.438 DM	280.179 DM
KAusbau	1.777.906 DM	1.753.990 DM	1.753.990 DM	1.753.990 DM	1.753.990 DM	1.753.990 DM
Hg	3,08 m	3,00 m	3,00 m	3,00 m	3,00 m	3,00 m
BRI	2.756,75 m³	2685,15 m³	2685,15 m³	2685,15 m³	2685,15 m³	2685,15 m³
BGF	895,05 m²	895,05 m²	895,05 m²	895,05 m²	895,05 m²	895,05 m²
Flexi	4	4	4	4	4	4

Tabelle 8-11: Ergebnisse Optimierung nach min. Herstellkosten und min. BRI

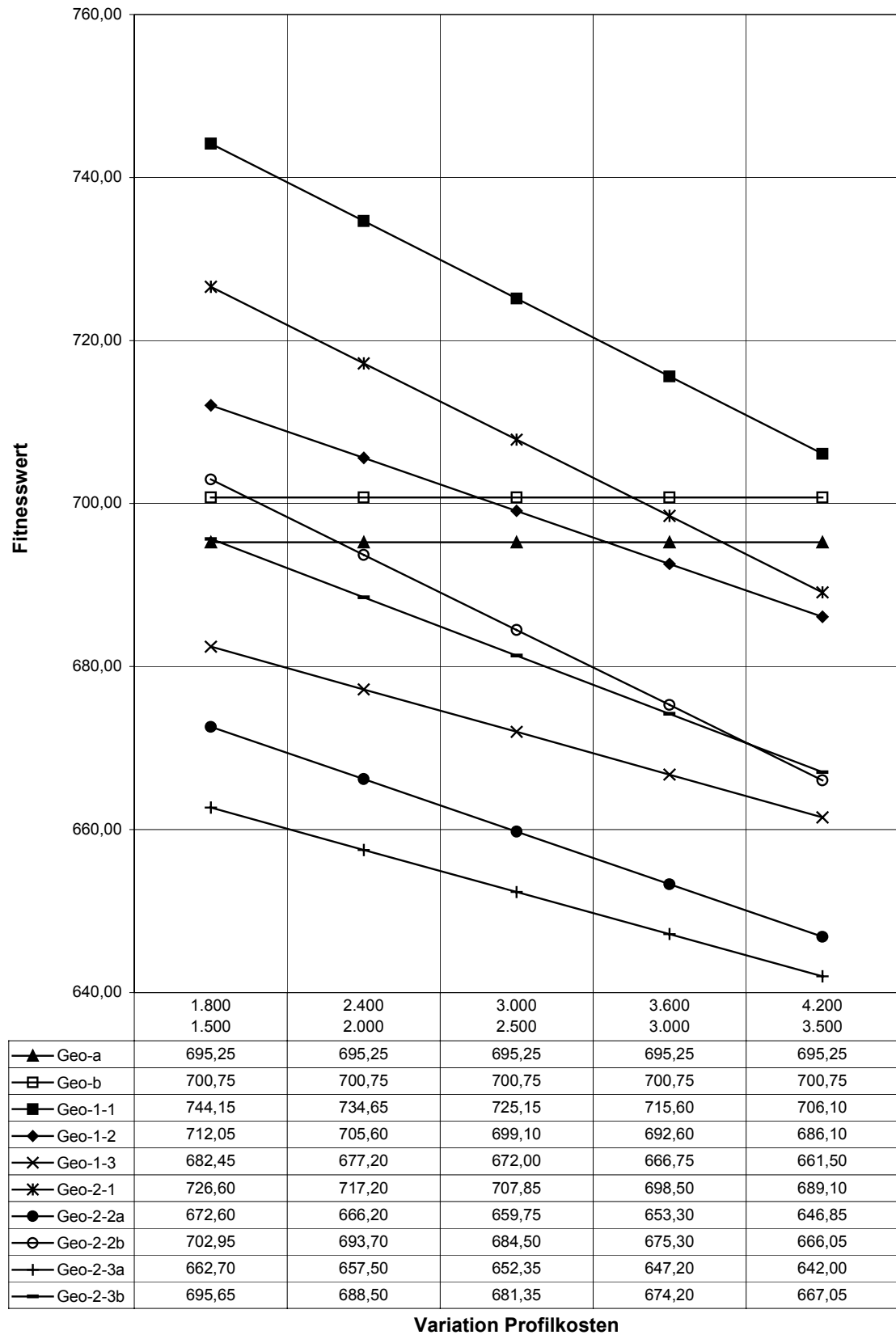


Abbildung 8-9: Fitnesswerte Kombination Herstellkosten (gew=5) und BRI (gew=5)

Im Gegensatz zu den vorigen Ergebnissen wird hier eine Ortbetonlösung gewählt, die in Gebäudelängsrichtung aus zwei Endfeldern mit 2,40 m Achsabstand und drei Innenfeldern mit 4,80 m Achsabstand besteht. Dadurch kann die Deckenhöhe von 20 cm auf 18 cm reduziert werden. In Gebäudequerrichtung werden wie bisher vier Stützenachsen angeordnet, wobei die Außenstütze 10 cm näher an die Fassade rückt. Durch diese Verschiebung wird die Durchlaufwirkung der Unterzüge etwas günstiger, was zu einem geringeren Verbrauch von Bewehrungsstahl führt und die Kosten senkt. Der direkte Vergleich der beiden Ortbetonlösungen zeigt, dass die Herstellkosten bei (Geo-b) etwas höher sind als bei (Geo-a), jedoch der BRI bei (Geo-b) geringer ist als bei (Geo-a). Insgesamt ist die Lösung (Geo-b) für die Kriterienkombination minimale Herstellkosten und minimaler BRI die bessere der beiden Ortbetonlösungen.

	Geo-a	Geo-b
Herstellkosten	2.005.877 DM	2.006.487 DM
normierte Bewertung	0,6726	0,6716
BRI [m³]	2774,66	2756,75
normierte Bewertung	0,7179	0,7299
Fitnesswert	695,25	700,75

*Tabelle 8-12: Vergleich Geo-a und Geo-b*

#### Beurteilung:

Die gewählte Verbundlösung hat mit 2685,15 m³ den kleinsten BRI aller betrachteten Lösungen. Dies resultiert aus der minimalen Geschosshöhe von 3,0 m, die infolge des minimalen Trägerabstandes und der minimalen Trägerspannweite möglich wird. In Abbildung 8-9 ist deutlich erkennbar, dass die Fitnesswerte der Lösung (Geo-1-1) deutlich über allen anderen Fitnesswerten liegen. Der geringe BRI der Lösung (Geo-1-1) hat einen großen Einfluss auf das Ergebnis, so dass die höheren Herstellkosten gegenüber der Ortbetonlösung (Geo-b) durch den Vorteil des geringen BRI ausgeglichen werden.

Das bedeutet, dass bei der Kriterienkombination von minimalen Herstellkosten und minimalem BRI eine Verbundlösung als bestmögliche Entwurfslösung ermittelt wird.

Auch dieses Ergebnis ist wiederum ein Beweis dafür, dass die Geschosshöhe eine wesentliche Einflussgröße ist.

### 8.2.8 Optimierung 8 (min. Rohbaukosten + min. BRI)

Die Ergebnisse der Optimierung nach minimalen Rohbaukosten und minimalem BRI sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt:

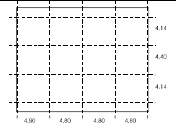
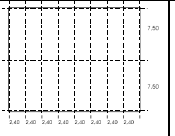
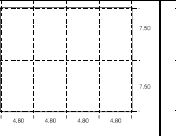
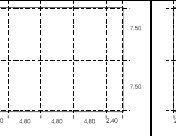
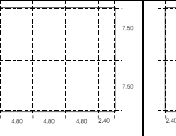
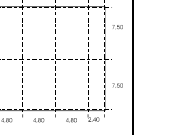
	Ortbeton	Verbund				
Geometrie	Geo-a	Geo-2-1	Geo-2-2a	Geo-2-3a	Geo-2-3a	Geo-2-3a
Variation		1	2	3	4	5
Profilträger		1500 DM/t	2000 DM/t	2500 DM/t	3000 DM/t	3500 DM/t
Profilstütze		1800 DM/t	2400 DM/t	3000 DM/t	3600 DM/t	4200 DM/t
Grundriss						
KHerstell	2.005.877 DM	1.993.036 DM	2.028.617 DM	2.039.026 DM	2.045.937 DM	2.052.848 DM
KRohbau	222.032 DM	215.291 DM	212.828 DM	217.232 DM	224.144 DM	231.055 DM
KAusbau	1.783.845 DM	1.777.745 DM	1.815.789 DM	1.821.794 DM	1.821.794 DM	1.821.794 DM
Hg	3,10 m	3,03 m	3,14 m	3,16 m	3,16 m	3,16 m
BRI	2.774,66 m³	2712,00 m³	2810,46 m³	2828,36 m³	2828,36 m³	2828,36 m³
BGF	895,05 m²	895,05 m²	895,05 m²	895,05 m²	895,05 m²	895,05 m²
Flexi	4	5	5	5	5	5

Tabelle 8-13: Ergebnisse Optimierung nach min. Rohbaukosten und min. BRI

#### Lösung Ortbeton:

Die hier berechnete Lösung in Ortbeton ist identisch mit der Lösung bei minimalen Herstellkosten (vgl. Kapitel 8.2.1).

#### Lösung Verbundbau:

Als Verbundlösungen werden Variationen der Geometrie 2 ermittelt. Diese besteht aus drei Stützenachsen in Gebäudequerrichtung mit zweimal 7,50 m Spannweite. Die Außenstützen sind an der Innenseite der Außenfassade angeordnet. Bei der Lösung (Geo-2-1) werden die Träger in einem Abstand von 2,40 m angeordnet und eine Verbunddecke ausgeführt. Dadurch ist eine geringe Geschosshöhe von 3,03 m möglich. Bei der Lösung (Geo-2-2a) wird eine Massivdecke verwendet, die in den Randfeldern 2,40 m und in den Innenfeldern 4,80 m weit spannt. Die Verbundträger werden mit einer Montageunterstützung hergestellt, und die Trägerprofile werden nach der geringsten Stahlfläche ermittelt. Die Lösung (Geo-2-3a) entspricht im Wesentlichen der Lösung (Geo-2-2a), die Massivdecke spannt jedoch mit gleichen Spannweiten über jeweils 4,80 m.

#### Beurteilung:

Bei der Ortbetonlösung ist die Lösung mit den geringeren Rohbaukosten gewählt. Das bedeutet, dass bei der Kombination von Rohbaukosten und BRI die Rohbaukosten maßgebend sind. Bei den Verbundlösungen ist für die Variationen 1 und 2 der BRI maßgebend, während für die Variationen 3 bis 5 die Rohbaukosten maßgebend für das Ergebnis werden. Das bedeutet, dass mit zunehmenden Profilstahlkosten die Rohbaukosten einen zunehmenden Einfluss auf das Ergebnis haben, so dass dann die Minimierung der Rohbaukosten wichtiger wird als die Minimierung des BRI.

Es ist auch festzuhalten, dass bereits ab Variation 3 die Verbundlösungen schlechter abschneiden als die Ortbetonlösung. Dies ist wieder ein Indiz dafür, dass die Vorteile der Verbundlösung nicht in den Rohbaukosten liegen.

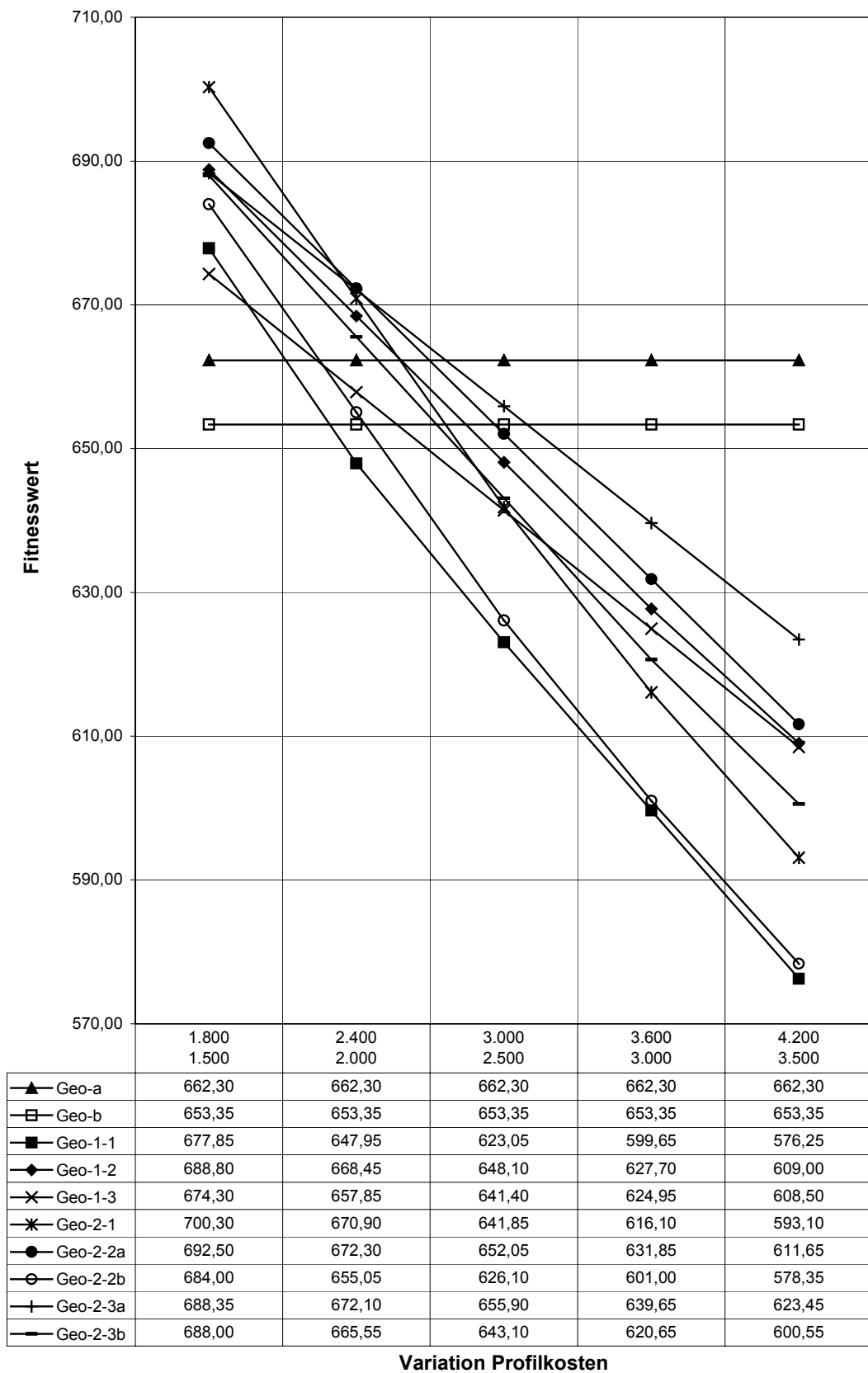


Abbildung 8-10: Fitnesswerte der Kombination Rohbaukosten (gew=5) und BRI (gew=5)



### 8.3 Auswertung bezogen auf Entwurfsparameter

#### 8.3.1 Leichte Trennwände

In den hier durchgeführten Vergleichsberechnungen ist das Trennwandsystem der Edding AG vorgegeben. Aus diesem Grund hat diese Variable keinen Einfluss auf die durchgeführten Vergleichsberechnungen.

#### 8.3.2 Unterdecke

Die Unterdeckensysteme haben über die Konstruktionshöhe einen direkten Einfluss auf die Geschosshöhe und somit auf die Gebäudegeometrie und die Gebäudekosten. Darüber hinaus entstehen auch Kosten durch den Einbau eines Unterdeckensystems. Um die Kosten zu minimieren, sollte daher auf eine Unterdecke verzichtet werden. Die Variante einer verputzten Deckenuntersicht wirkt sich ebenfalls auf die Kosten aus, so dass allgemein gesagt werden kann, dass ein Verzicht auf eine Unterdeckenkonstruktion sowohl eine geringere Geschosshöhe als auch geringere Kosten zur Folge hat.

#### 8.3.3 Elektroinstallation

Die verschiedenen Möglichkeiten der Verlegung haben eine Auswirkung auf die Geschosshöhe und auf die Baukosten. Anforderungen an Flexibilität und Installationsdichte sind bisher nicht in dem Modell berücksichtigt. Die Verlegung der Elektroinstallation in einem Kabelkanal entlang der Längsfassade führt daher zu den geringsten Kosten.

#### 8.3.4 Heizungs- Lüftungsinstallation

Ähnlich wie bei der Elektroinstallation wirkt sich die Anordnung der Heizungs- und Lüftungsinstallation auf die Geschosshöhe aus. Aus diesem Grund wird bei allen Lösungen die Installation so geführt, dass kein Einfluss auf die Geschosshöhe entsteht. Sofern eine Lüftungsanlage vorgesehen werden soll, werden die notwendigen Rohre direkt unterhalb der Decke verlegt.

#### 8.3.5 Fußboden

Der Fußboden wird über den Fußbodentyp und die Fußbodenhöhe bestimmt. Obwohl bei einem Doppelboden (Höhe  $\geq 12$  cm) die Kosten der Elektroinstallation gesenkt werden können, ist die Kombination von Estrichfußboden und Kabelkanal günstiger. Darüber hinaus wird mit einem Estrichfußboden eine geringe Geschosshöhe erreicht. Das bedeutet, dass auch in diesem Fall die Minimierung der Geschosshöhe einen großen Einfluss auf die Berechnungsergebnisse und auf die Gebäudekosten hat. Daher wird bei allen Optimierungsergebnissen ein Estrichfußboden mit einer vordefinierten minimalen Höhe von 10 cm gewählt. Infolge erhöhter Ansprüche an die Elektroinstallation können aber Hohlraum- und Doppelböden notwendig werden. In diesem Fall ist die Wahl des Fußbodentyps keine freie Variable mehr.

#### 8.3.6 Raster

Bei allen Optimierungsergebnissen ist ein deckungsgleiches Raster gewählt. Dies liegt daran, dass bei getrenntem Ausbau- und Konstruktionsraster die Stützenabstände in Längsrichtung aus zwei gleichen Randfeldern und mehreren gleich großen Innenfeldern bestehen. Aufgrund dieser Definition und einer vorgegebenen Anzahl von 8 Standardbüros je Fassadenseite erhöht sich die Gebäudelänge um ein Rastermaß gegenüber der Variante mit deckungsgleichem Raster (siehe Abbildung 8-11). Die größere Gebäudelänge führt zu einer Erhöhung der Fläche und somit zu einer Erhöhung von BRI und Kosten.

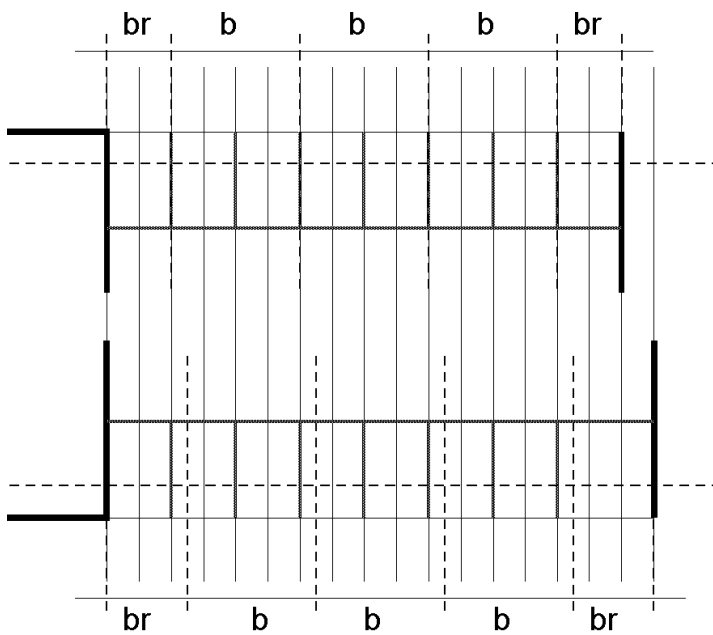


Abbildung 8-11: Vergleich Längsgeometrie bei unterschiedlicher Rasterart

### 8.3.7 Stützenstellung außen

Die Stellung der Außenstütze hat nur einen Einfluss bei der Ortbetonbauweise. Hier beeinflusst die Stützenstellung die wirtschaftliche Ausnutzung des Unterzugs. Bei Unterzügen in Gebäudequerrichtung und einer inneren Anordnung der Außenstütze sorgt die Länge des Kragarms für ein günstiges Feldmoment, welches den Bedarf an Bewehrungsstahl und damit die Rohbaukosten senkt.

Bei Verbundlösungen wird die Außenstütze immer an der Fassadeninnenseite angeordnet. Somit ist die für Verbundlösungen geringste Spannweite bei Unterzügen in Gebäudequerrichtung möglich.

### 8.3.8 Stützenstellung innen

Die Stellung der Innenstütze hat eine direkte Auswirkung auf die Spannweite der Deckenkonstruktion und auf die Gebäudebreite.

Bei Anordnung der Unterzüge in Gebäudequerrichtung können bei einer günstigen Anordnung der Stütze die Spannweiten angeglichen und somit wirtschaftliche Deckenkonstruktionen geplant werden. So werden für die Ortbetonlösung mit Unterzügen in Gebäudequerrichtung (Geo-a) Stützweiten von  $l_{\text{krag}} = 1,31 \text{ m} - l_1 = 4,14 \text{ m} - l_2 = 4,40 \text{ m} - l_1 = 4,14 \text{ m} - l_{\text{krag}} = 1,31 \text{ m}$  gewählt. Durch die günstige Momentenverteilung können die Betonunterzüge wirtschaftlich und mit einer geringen Konstruktionshöhe ausgeführt werden. Dies hat wiederum einen günstigen Einfluss auf die Geschosshöhe.

Bei einer Anordnung der Innenstütze im Flurbereich wird die Flurbreite an der Stelle der Stütze berechnet. Das bedeutet, dass in diesem Fall die Breite der Flurzone um die Stützenbreite und den Abstand der Stütze von der Trennwand vergrößert wird. Dies wirkt sich sofort auf die Gebäudebreite und somit auf die Kosten aus. Bei einer Anordnung der Innenstütze in der Gemeinschaftszone hat die Stützenbreite keinen Einfluss auf Gebäudebreite und Kosten.

Aus den Anforderungen einer günstigen Momentenverteilung und einer minimalen Gebäudebreite heraus werden bei einer Konstruktion mit vier Stützachsen in Gebäudebreite die Innenstützen am Rand der Gemeinschaftszone angeordnet.

Bei Konstruktionen mit drei Stützachsen in Gebäudebreite wird die Achse der Innenstütze mittig in der Gemeinschaftszone angeordnet. Diese mittige Anordnung hat ebenfalls keinen Einfluss auf die Gebäudebreite.

### 8.3.9 Flurbreite

Die Flurbreite wirkt sich direkt auf die Gebäudebreite und somit auf die Herstell- und Rohbaukosten aus. Daher wird bei allen Optimierungsergebnissen die minimal mögliche Flurbreite gewählt.

### 8.3.10 Längsgeometrie

Die Längsgeometrie wirkt sich über die Dicke der Deckenkonstruktion direkt auf die Geschosshöhe aus. Infolge der Annahmen, dass die letzte Rasterachse um eine halbe Trennwanddicke vor der Giebelwand sitzt, ergibt sich für das Endfeld eine um 15 cm größere Spannweite als der Abstand der Konstruktionsachsen. Aus diesem Grund ist bei durchlaufenden Systemen mit gleichen Spannweiten immer das Endfeld für die Ermittlung der Konstruktionshöhe maßgebend. Da die Minimierung der Geschosshöhe eine große Rolle spielt, werden teilweise Lösungen mit kürzeren Spannweiten in den Endfeldern gewählt. Dadurch kann die Dicke der Geschosdecke reduziert werden.

### 8.3.11 Stützenstellung

Die Auswertung der Vergleichsberechnungen ergibt, dass die Stützenstellung ein wesentlicher Parameter zur Steuerung des Endergebnisses ist.

Bei Ortbetonlösungen wird immer eine Stützenstellung mit vier Konstruktionsachsen in Gebäudequerrichtung gewählt. Durch diese Anordnung können Unterzüge mit geringen Höhen ausgeführt werden. Das wiederum führt zu einer minimalen Geschosshöhe, die sich günstig auf die Kosten auswirkt.

Bei den Verbundlösungen werden teilweise Systeme mit nur drei Konstruktionsachsen in Gebäudequerrichtung gewählt. Dies tritt aber immer dann auf, wenn das Kriterium der minimalen Rohbaukosten verwendet wird. Da die Profilstahlkosten einen sehr hohen Anteil an den Rohbaukosten einnehmen, werden Lösungen gewählt, die mit einem minimalen Anteil an Profilstahl auskommen. In diesem Fall wird die Anzahl der Stützachsen von vier auf drei reduziert.

### 8.3.12 Deckenkonstruktion

Die Deckenkonstruktion ist ein weiterer wichtiger Parameter bei den Berechnungen, der sich direkt auf die Geschosshöhe auswirkt. Da die Minimierung der Geschosshöhe bei den Kostenkriterien eine wichtige Rolle spielt, wird bei allen Ergebnissen ein System mit minimaler Konstruktionshöhe gewählt.

Bei einer vorgegebenen lichten Raumhöhe von 2,80 m und einer freien Durchgangshöhe von 2,50 m entsteht ein Bereich, in dem Unterzüge angeordnet werden können, ohne dass sich dadurch die Geschosshöhe ändert. Bei Unterzügen in Gebäudelängsrichtung vergrößert sich die Geschosshöhe entweder infolge größerer Deckenspannweiten oder infolge der Bedingung einer natürlichen Belichtung. Bei Flachdecken ergeben sich dickere Deckenkonstruktionen, die ebenfalls zu einer Vergrößerung der Geschosshöhe führen. Somit werden die geringsten Geschosshöhen bei Deckenkonstruktionen mit Unterzügen in Gebäudequerrichtung erzielt. Diese Lösungen wurden auch bei allen Vergleichsberechnungen gewählt.

Auswirkungen der Deckenkonstruktion auf die Trennwandanschlüsse wurden nicht näher untersucht, da bei den Berechnungen eine Anpassung der Trennwände an das Konstruktionsraster vorgegeben wurde. In diesem Fall sind die Kostenunterschiede gering und können daher vernachlässigt werden.

### 8.3.13 Ausführung der StB-Stützen

Infolge der Fertigung und der Brandschutzbestimmungen werden die Stützen mit einer Mindestdicke von 30 cm ausgeführt. Bei den hier untersuchten Lasten sind diese Stützen nur gering ausgelastet, so dass unter anderem die Mindestbewehrung maßgebend wird. Da die Mindestbewehrung eine Funktion des Stützenquerschnitts ist und die Rundstütze mit 30 cm Durchmesser eine kleinere Fläche und damit einen geringeren Materialverbrauch als die Rechteckstütze mit 30 cm x 30 cm hat, wird in diesen Fällen die Rundstütze vorgezogen.

### 8.3.14 Profilwahl Stahlverbundträger

Da ein großer Teil der Ergebnisse von der Menge des Profilstahls und damit von dessen Kosten abhängt und die Querschnittsfläche bei IPE-Profilen deutlich geringer ist als bei HEA und HEB Profilen, werden in der Regel die Profile nach der Querschnittsfläche bestimmt.

### 8.3.15 Montageart Stahlverbundträger

Durch die Anordnung einer Hilfsstütze bei der Montage kann die Trägerhöhe bei größeren Spannweiten verringert werden. Zusätzlich werden aber auch die Rohbaukosten höher, da die Kosten für eine Montageunterstützung zusätzlich anfallen. Bei kleinen bis mittleren Spannweiten werden die Verbundträger in der Regel ohne Montageunterstützung hergestellt. Bei den Lösungen (Geo-2-2a) und (Geo-2-3-a) mit einer Spannweite von jeweils 7,50 m werden die Verbundträger mit einer Montageunterstützung ausgeführt. Dadurch können kleinere Profilhöhen verwendet werden, was wiederum zu einer geringeren Geschosshöhe führt.

### 8.3.16 Deckenart Stahlverbundbauweise

Bei den Verbundlösungen wird nur für kleine Spannweiten (2,40 m) eine Verbunddecke ausgeführt. Das liegt daran, dass in diesen Fällen die geringe Höhe der Deckenkonstruktion zu einer geringen Geschosshöhe und somit zu geringen Kosten führt. Bei größeren Spannweiten können die Kosteneinsparungen infolge der geringen Bauhöhe die Mehrkosten aus dem Trapezblech nicht mehr ausgleichen. Daher wird in solchen Fällen immer eine Betondecke ausgeführt werden. Da die Betondecke als Elementdecke mit Aufbeton sehr preisgünstig hergestellt werden kann, ist diese Decken in der Regel günstiger als eine Verbunddecke.

## 8.4 Allgemeine Aussagen

Ein allgemeines Ergebnis der durchgeführten Vergleichsberechnungen ist die Erkenntnis, dass bei Büro- bzw. Skelettbauten die Konstruktionsparameter und die Geschosshöhe die wesentlichen Parameter für eine Entwurfsoptimierung darstellen. Bei einer Minimierung der Geschosshöhe bedeutet dies eine Minimierung des BRI. Dies führt zu geringeren Herstell-, Rohbau- und Nutzungskosten sowie zu einem geringeren jährlichen Energiebedarf. Daher ist die Minimierung der Geschosshöhe eine wichtige Forderung zur Minimierung der Kosten. Wichtig ist in diesem Zusammenhang, dass sich die Geschosshöhe aus der Summe von Fußbodenhöhe, lichter Raumhöhe und Konstruktionshöhe der Decke zusammensetzt. Da die lichte Raumhöhe über das Kriterium der natürlichen Belichtung der Standardbüros und die zugehörigen Abmessungen definiert wird, bedeutet die Minimierung der Geschosshöhe die Minimierung der Konstruktionshöhen von Fußboden und Decke.

Die gegenseitige Abhängigkeit von Geschosshöhe und Tragkonstruktion spielt auch bei der ganzheitlichen Kostenoptimierung eine wesentliche Rolle. Infolge einer ganzheitlichen Betrachtungsweise und einer minimierten Geschosshöhe können der Verbundbauweise wirtschaftliche Chancen eingeräumt werden, obwohl die Rohbaukosten höher sind als bei der Ort betonbauweise. Dies gelingt allerdings nur, wenn die Einsparungen an den Ausbaurkosten infolge einer geringen Geschosshöhe die Mehrkosten im Rohbau übersteigen. Wie im vorherigen Absatz

erläutert, gilt dies allerdings nur, wenn die Anordnung von Unterzügen aus den entwurflichen Randbedingungen durchführbar ist, wenn auf eine Unterdecke verzichtet wird und gleichzeitig die lichte Raumhöhe bis zur Unterkante der Decke gemessen wird und wenn die Unterkanten der Verbundträger ein vorgegebenes Mindestmaß nicht unterschreiten. Bei dem Vergleich der ausgeführten Geometrie und Konstruktion der Edding AG mit den Optimierungsergebnissen wird festgestellt, dass die ausgeführte Lösung sowohl in den Kosten als auch im BRI schlechter abschneidet als die Berechnungsergebnisse. Dies liegt im wesentlichen an der ausgeführten Flachdeckenkonstruktion, welche im Rohbau sehr teuer ist. Unter der Annahme, dass die lichte Raumhöhe auch bei Anordnung von Unterzügen bis zur Unterkante der Decke gerechnet wird, führt die erforderliche Deckendicke einer Flachdecke ebenfalls zu einer größeren Geschosshöhe und somit zu einem höheren BRI. Der große Vorteil einer Flachdecke liegt jedoch in der Flexibilität der Bürofläche. Diese hohe Flexibilität wird von keiner Optimierungslösung erreicht. Da aber die Flexibilität der Fläche, die u. a. aus der glatten unterzugfreien Untersicht der Geschossdecken resultiert, eine maßgebende Randbedingung im Entwurf war und bei neueren Projekten auch ist, sollten auch im Verbundbau Flachdeckensysteme entwickelt (z. B. System der Firma ARBED) und eingesetzt werden. Die Entwicklung und Verbesserung von Flachdeckensystemen im Verbundbau ist meiner Meinung nach eine notwendige Entwicklungs- und Forschungsrichtung, um die Wettbewerbsfähigkeit der Verbundbauweise bei geringeren Spannweiten im Hochbau zu erhöhen.

Die unterschiedlichen Ergebnisse in Abhängigkeit von Einzelkriterien oder Kriterienkombinationen werden in der Regel von wenigen Parametern beeinflusst. Bei den hier untersuchten Grundmodulen von Bürogebäuden lässt sich feststellen, dass die Qualität der unterschiedlichen Ergebnisse von nachfolgenden Variablen abhängt, die alle die Tragkonstruktion beeinflussen: Bauweise - allgemeine Stützenstellung - Stellung der Außenstütze - Stellung der Innenstütze – Längsgeometrie – Deckenkonstruktion - Ausführung einer StB-Stütze bei Ortbetonbauweise - Wahl des Profilquerschnitts, der Montageart und der Ausführung der Decke bei Verbundbauweisen. Das bedeutet, dass durch die Wahl des Tragwerks ein wesentlicher Einfluss auf die Kosten eines Gebäudes genommen werden kann. Allgemein kann durch eine Optimierung des Tragwerks im ganzheitlichen Zusammenhang die Entwurfsqualität wesentlich beeinflusst werden.

Die Anwendung der Verbundbauweise im allgemeinen Hochbau, wie hier am Beispiel von Bürobauten untersucht, weist allerdings einige Nachteile auf, die zu einer Reduzierung der Wettbewerbsfähigkeit im Vergleich zur Ortbetonbauweise führen.

Ein wichtiger Nachteil resultiert aus der Ausbildung des Verbundträgerquerschnitts. Die größte Tragfähigkeit erreichen Verbundträger, wenn die beiden Materialien Stahl und Beton ihren Werkstoffeigenschaften entsprechend eingesetzt werden. Diese Vorteile können voll ausgeschöpft werden, wenn man einen Verbundträger als Einfeldträger einsetzt. Bei der üblichen Querschnittsausbildung eines Verbundträgers aus I-Profil und mitwirkender Breite der Betondecke stellt man fest, dass im Endzustand die Masse des oberen Flansches in der Nähe der neutralen Faser des Querschnitts liegt. Das bedeutet, dass der obere Flansch fast keinen Beitrag zur Lastableitung leistet. Dieser Flansch wird nur für den Bauzustand, im Vergleich zur geplanten Lebensdauer des Gebäudes eine sehr kurze Zeit, benötigt. Damit ist der obere Flansch des Stahlprofils eigentlich überflüssig. Aus den Vergleichsberechnungen dieser Arbeit geht hervor, dass ein Großteil der Rohbaukosten bei Verbundkonstruktionen durch die Menge des benötigten Profilstahls erzeugt werden. Auch wurde gezeigt, dass die Verbundbauweise nur dann eine Chance gegenüber der Ortbetonbauweise hat, wenn die Einsparungen infolge einer geringeren Geschosshöhe größer sind als die Mehrausgaben im Rohbau für den Profilstahl. Daraus leitet sich eine neue Chance für den Verbundbau ab. Wenn durch eine geänderte Querschnittsform des Stahlprofils, etwa ein  $\perp$ -Profil, die Menge des verwendeten Baustahls bei gleicher Tragfähigkeit

higkeit reduziert werden kann, lassen sich die Kosten reduzieren, und die Verbundbauweise kann sich auch bei steigenden Preisen gegenüber der Ortbetonbauweise behaupten. Neben den Vorteilen im Endzustand sind natürlich auch der Bauzustand und der Brandfall zu untersuchen. Für den Bauzustand ist darüber nachzudenken, ob der Kammerbeton als Druckgurt des  $\perp$ -Profils fungieren kann. Dazu ist es erforderlich, eine entsprechende Verdübelung zwischen Kammerbeton und Stahl herzustellen. Das Betonieren des Kammerbetons kann problemlos in den vorhandenen Stahlschalungen für Betonfertigteilträger erfolgen.

Ein weiterer Nachteil der Verbundbauweise ist der schnelle Verlust der Tragfähigkeit im Brandfall durch die hohe Wärmeleitfähigkeit des Stahls. Ein ausreichender Brandschutz kann bei Verbundträgern durch das Ausbetonieren der Kammern und durch Einfügen einer Brandschutzbewehrung inklusive Verbügelung erreicht werden. Der Anteil an Beton und Bewehrungsstahl erhöht aber die Kosten des Verbundträgers, was wiederum zu wirtschaftlichen Nachteilen führt. Um die Chancen der Verbundbauweise zu erhöhen, sind Lösungen für Verbundträger ohne Kammerbeton zu entwickeln. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, ob bei kürzeren Spannweiten bis ungefähr 8 m eine Biegebemessung im Brandfall mit reduzierten Materialfestigkeiten das richtige Bemessungskonzept ist.

Grundlage für weitergehende Überlegungen auf diesem Gebiet soll folgende Idee sein, die sich aus den obigen Überlegungen ergeben hat. Ein ungeschütztes Walzprofil verliert im Brandfall seine Biegesteifigkeit, jedoch behält der obere Flansch, der durch die Speicherfähigkeit der Betondecke geschützt ist, eine restliche Zugfestigkeit. Die Idee für ein alternatives Bemessungskonzept basiert auf der Veränderung des statischen Systems im Brandfall. Es wird kein Trägersystem betrachtet, sondern eine Zugbandsystem, bei dem der obere Flansch als Zugband funktioniert. Die an den Stützen auftretenden horizontalen Zugkräfte können über die Geschossdecke ins Gleichgewicht gesetzt werden.

Der hier gemachte Ansatz zur Einbeziehung der Nutzungskosten führt zu keinen neuen Ergebnissen. Das liegt daran, dass durch die getroffenen Annahmen die Nutzungskosten von den Kapitalkosten bestimmt werden. Unter der Voraussetzung, dass die Finanzierung jeweils zu 50% aus Eigen- und Fremdkapital erfolgt, wurden bei den durchgeführten Vergleichsberechnungen die Nutzungskosten zu 79% von den Kapitalkosten bestimmt. Die Kosten für die Gebäudereinigung waren mit ungefähr 18% in den Nutzungskosten enthalten. Die Kosten für die Gebäudereinigung hängen größtenteils von der zu reinigenden Fläche ab und nur im geringen Maße von der Fassadenfläche. Bei allen verschiedenen Lösungen war die BGF identisch. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die Kosten Gebäudereinigung größtenteils von der Lösungsgeometrie unabhängig sind und keinen großen Einfluss auf die Nutzungskosten haben. Die Energiekosten sind mit nur etwa 3% Anteil an den Nutzungskosten vernachlässigbar. Aus diesen Überlegungen heraus macht eine Betrachtung der Nutzungskosten keinen Sinn. Im Zusammenhang mit einer differenzierteren Betrachtung dieses Kriterium, z. B. unter Einbeziehung der Bauzeit, können sich jedoch interessante neue Zusammenhänge ergeben, die unter Umständen zu weiteren Vorteilen für die Verbundbauweise führen.

## 9 Zusammenfassung und Ausblicke

In der vorgelegten Arbeit wurde mit Hilfe eines ganzheitlichen Bewertungsmodells ein Ansatz zur Entwurfsoptimierung hergeleitet, dessen Funktionalität und Anwendbarkeit exemplarisch am Beispiel von Bürogeschossbauten nachgewiesen wurde.

Aus der Analyse des Entwurfsprozesses wurde der Begriff der Entwurfsoptimierung definiert, und es wurden die prinzipiellen Überlegungen und Anforderungen für ein rechnergestütztes Modell abgeleitet.

Nach einem kurzen Überblick über das Thema der Optimierung wurden die genetischen Algorithmen als Optimierungsverfahren für eine Entwurfsoptimierung ausgewählt. Dieses Verfahren wurde genau analysiert und entsprechend den Anforderungen einer Entwurfsoptimierung modifiziert. Mit Hilfe von verschiedenen Testfunktionen wurde der modifizierte Genetische Algorithmus getestet und auf die Anwendbarkeit überprüft. Der Algorithmus hat sich als gut funktionierend und leistungsfähig herausgestellt und kann als allgemeine Grundlage für eine Entwurfsoptimierung verwendet werden. Schwierigkeiten können nur in Bezug auf die Feinsteuerung von reellen Variablen auftreten; sie sind jedoch von untergeordneter Bedeutung, da die erreichte Maßgenauigkeit in der Vor- bzw. frühen Entwurfsplanung ausreichend ist.

Dieses Modell wurde in einen allgemeinen methodischen Ansatz zur ganzheitlichen Entwurfsoptimierung integriert und in dieser Arbeit exemplarisch auf den Entwurf von Bürogeschossbauten angewendet. Dazu wurden alle erforderlichen Entwurfsvariablen als Parameter definiert. Zusätzlich wurden die Verknüpfungen und Abhängigkeiten der Parameter formuliert und ein mathematisches Entwurfsmodell entwickelt. Dieses Modell wurde in Kombination mit dem Optimierungsalgorithmus in ein EDV-Programm umgesetzt.

Für die Entwurfsbeurteilung und -optimierung wurden verschiedene Kriterien diskutiert. Ein wesentliches Kriterium sind die Baukosten. Die übliche Definition des Begriffs Baukosten entspricht nicht der hier geforderten ganzheitlichen Betrachtungsweise. Aus diesem Grund wurde der Begriff neu definiert. Das nach DIN 276 übliche Berechnungsverfahren wurde ebenfalls kritisch beurteilt und durch ein dem Bauablauf besser angepasstes Verfahren ersetzt.

Neben dem Kostenkriterium wurden neue bzw. zukünftige Kriterien vorgestellt und diskutiert. Ein Teil davon wurde definiert und mit einem einfachen Ansatz in das Bewertungsmodell sowie in das EDV-Programm integriert. Diese einfachen Ansätze sowie die restlichen angesprochenen Kriterien sollen als Anstoß für weitergehende Untersuchungen im Zusammenhang mit einer ganzheitlichen Entwurfsoptimierung dienen.

Die allgemeinen Annahmen und der systematische Aufbau der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Software wurden im Kapitel 6 beschrieben.

Für die Vergleichsberechnungen wurde ein reales Projekt, das Bürogebäude der Edding AG in Ahrensburg, ausgewählt und beschrieben (Kapitel 7). Die notwendigen Gebäudedaten wurden hergeleitet und als Entwurfsvariablen in das rechnergestützte System integriert.

Es wurden umfangreiche Parameterstudien mit verschiedenen Einzelkriterien und Kriterienkombinationen durchgeführt. Der Schwerpunkt der Untersuchung lag im Vergleich von Ortbe- ton- und Verbundbauweise. Aus den Berechnungsergebnissen wurden Aussagen über die Bedeutung der einzelnen Entwurfsparameter auf das Optimierungsergebnis gemacht und die für den Entwurf von Bürogeschossbauten wichtigen Zusammenhänge dargestellt (Kapitel 8). Eine wesentliche Erkenntnis aus den durchgeführten Berechnungen ist die Tatsache, dass das Tragwerk den größten Einfluss auf das Optimierungsergebnis hat.

Die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen und die Entwicklung eines Modellansatzes zum Thema der ganzheitlichen Entwurfsoptimierung zeigen einen neuen Ansatz im Planungs-

prozess, die komplexen Zusammenhänge eines Entwurfs zu erfassen und die gewonnenen Erkenntnisse den Planern frühzeitig zur Verfügung zu stellen.

Diese automatisierte Entwurfsbearbeitung ist eine Arbeitshilfe, ein Werkzeug, mit dem komplexe Zusammenhänge schneller verstanden und Auswirkungen einzelner Entwurfsentscheidungen in einem ganzheitlichen Umfeld erkannt werden können. Darüber hinaus können die Ergebnisse der Entwurfsoptimierung als Ausgangspunkt für den weiteren Planungsprozess dienen. Mit dieser Methode des EDV- unterstützten Entwerfens kann auch die Planungsgeschwindigkeit und die Planungssicherheit erhöht werden, was sowohl für Planer als auch für Bauherren von großer Bedeutung ist.

Die Funktionalität und Anwendbarkeit des hier entwickelten methodischen Ansatzes zur ganzheitlichen Entwurfsoptimierung konnte exemplarisch nachgewiesen werden. Darüber hinaus sind zusätzliche Anwendungsgebiete mit repetitiven Konstruktionen, Flächen, oder Räumen, z. B. Hallen, Schulen, Krankenhäuser, eventuell sogar Wohnsiedlungen, denkbar. In weiterführenden Arbeiten sollten die Modelle der Bewertungskriterien verfeinert und weiterentwickelt werden. Es sollten auch weitere Kriterien definiert und entwickelt werden, wie z. B. ein Kriterium mit dem die Rückbaubarkeit und Wiederverwendbarkeit von Gebäuden bewertet werden kann.

Im Zusammenhang mit der aktuellen Diskussion der integralen Planung ist der Verfasser der Meinung, dass ein Bedarf an weiterführenden Forschungen auf dem hier neu definierte Gebiet der ganzheitlichen Entwurfsoptimierung besteht.

Ausgehend von den ersten Überlegungen zur Stahlverbundbauweise und der eingangs gestellten Frage nach der Erhöhung der Wirtschaftlichkeit von Stahlverbundkonstruktionen kann zum Abschluss dieser Arbeit gesagt werden, dass die Verbundbauweise bei einer ganzheitlichen Betrachtung Chancen hat, im Bürogeschossbau wirtschaftlich eingesetzt zu werden. Durch die Weiterentwicklung von Verbund-Flachdeckensystemen, durch die Veränderung der Verbundträgerquerschnitte und eventuell durch eine Änderung der Brandschutzbemessung kann die Wettbewerbsfähigkeit der Verbundbauweise gesteigert werden.



## 10 Literaturverzeichnis

- [1] *Ackermann K.*; Grundlagen für das Entwerfen und Konstruieren, Karl Krämer Verlag Stuttgart, 1983
- [2] *Assman & Partner*; Braunschweig, Ökologischer Vergleich von Wettbewerbsprojekten, Realisierungswettbewerb Messehalle 13, Messe Hannover
- [3] *Avak Ralf*; Euro-Stahlbetonbau in Beispielen Düsseldorf, Werner-Verlag, 1996
- [4] *Baier H.*; Optimierung in der Strukturmechanik, Vieweg&Sohn Braunschweig/Wiesbaden, 1994
- [5] *Bamberg G., Coenenberg G.*; Betriebswirtschaftliche Entscheidungslehre, 9. Auflage, Verlag Franz Vahlen München, 1996
- [6] *Biethahn Jörg, Nissen Volker*; Evolutionary Algorithms in management applications, Springer Verlag Berlin-Heidelberg 1995
- [7] *Bing Chen*; Experimentelle Optimum-Suchstrategien auf der Basis der Computersimulation zur Unterstützung betriebswirtschaftlicher Entscheidungsfindung; Lang, Frankfurt am Main, 1990
- [8] *Bode, H.*; Euro-Verbundbau, Werner Verlag, Düsseldorf, 1998
- [9] *Bode, H.*; Verbundkonstruktionen, Stahlbau Handbuch, Band 1, Teil A, Kap. 13, Köln, 1993
- [10] *Brandt J., Moritz H.*; Bauphysik nach Maß, Planungshilfen für Hochbauten aus Beton, Schriftenreihe der Bauberatung Zement
- [11] *Chambers Lance*; Practical Handbook of genetic algorithms: applications, CRC-Press, Boca Raton, Floriad, 1995
- [12] *Churgin u. Peschel Manfred*; Optimierung von Erzeugnissen und Prozessen ; ein- und mehrkriterielle Methoden; München [u.a.] ; Oldenbourg, 1990
- [13] *Diederichs C.J., Herpermann H.*; Kostenermittlung im Hochbau durch Kalkulation von Leitpositionen, Schriftenreihe des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, 1986, 04.115
- [14] *Diederichs, C.J.*; Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen Nutzen/Kosten Untersuchungen, Allgemeine Grundlagen und speziell Anwendungen; Expert Verlag Sindelfingen, 1985
- [15] *Dinort Günter*; Richtig kalkulieren im Hochbau, Köln, Rudolph Müller, 1993
- [16] *Dorn Th., Hosser D., El-Nesr O.*; Vereinfachtes Verfahren zur brandschutztechnischen Bemessung von Verbundstützen aus kammerbetonierten Stahlprofilen, Stahlbau 63 (1994), Heft 3+4
- [17] *Dorn Th., Hosser D., Muess J., Schaumann P.*; Ein rechnerisches Verfahren zur brandschutztechnischen Bemessung von kammerbetonierten Verbundträgern Teil I: Einfeldträger, Stahlbau 59 (1990), Heft 12
- [18] *Drees, G.*; Ausgewählte Kapitel der Baubetriebslehre, Schriftenreihe Institut für Baubetriebslehre, Universität Stuttgart
- [19] *Dyllisch-Brenzinger F.*; Betriebskosten von Büro- und Verwaltungsgebäuden, Bauverlag Wiesbaden-Berlin 1980
- [20] *Eisenführ F., Weber M.*; Rationales Entscheiden, 2. Auflage 1994, Springer Verlag
- [21] *Eschenaur Hans; Koski Juhani*; Multicriteria design optimization ; procedures and applications; Berlin [u.a.] ; Springer, 1990
- [22] *Faass Reinhard*; Querschnittsoptimierung von Blattfedern in Faserverbund-/Metall-Hybridbauweise; Düsseldorf ; VDI-Verl., 1993
- [23] *Fontana, M.*; Stahlverbund im Hochbau, Schweizer Ingenieur und Architekt, Nr. 30-31, 30. Juli 1990, Seite 847 ff.

- [24] *Frick; Knöll; Neumann; Weinbrenner*; Baukonstruktionslehre, Teil 1, Teubner-Verlag, Stuttgart, 1997
- [25] *Gehm, W.; Muess; H., Schaub, W.*; Neubau eines mehrgeschossigen Werkstattgebäudes in Stahlverbundbauweise für das Forschungs- und Ingenieurzentrum der Bayerischen Motorenwerke AG Bauingenieur 62 (1987), Seiten 407-417.
- [26] *Goldberg David E.*; Genetic Algorithms in search, optimization, and machine learning, Addison-Wesley Publishing Company, 1989
- [27] *Goldberg David E.*; Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning; Reading, Mass [u.a.] ; Addison-Wesley Publishing Company, 1995
- [28] *Gottschalk Ottomar*; Flexible Verwaltungsbauten ; Richtwerte, Lösungen, Kosten; Bauverlerlag, Wiesbaden, 1979
- [29] *Gottschalk Ottomar*; Verwaltungsbauten; flexibel-kommunikativ-Nutzerorientiert, 4.Auflage, Bauverlag, Wiesbaden, 1994
- [30] *Grasser, E., Thielen G.*; Hilfsmittel zur Berechnung der Schnittgrößen und Formänderungen von Stahlbetontragwerken nach DIN 1045 Ausgabe Juki 1988; 3. Überarbeitete Auflage, Beuth-Verlag, Berlin, 1991, (Heft 240 DafStB)
- [31] *Grossmann Christian und Terno Johannes*; Numerik der Optimierung; Teubner-Verlag, Stuttgart, 1993
- [32] *Grossmann Wilfried, Bomze Immanuel*; Optimierung-eine Einführung in Operations Research für Wirtschaftsinformatiker, BI Wissenschaftsverlag, 1993
- [33] *Hahn Hermann*; Das moderne Bürogebäude ; eine komplexe Planungsaufgabe ; Expert-Verlag, Ehningen bei Böblingen, 1991
- [34] *Hass, R*; Brandschutztechnische Beurteilung von Holortrib-Verbunddecken nach DIN 4102, Teil 2 1977, Hosser, Hass + Partner, Ingenieurgesellschaft für Bauwesen und Brandschutz mbH, Braunschweig
- [35] *Hauser G., Hausladen G.*; Forschungsbericht ,Energiebilanzierung von Gebäuden, Karl Krämer Verlag, Stuttgart, 1998
- [36] *Heistermann Jochen*; Genetische Algorithmen, Theorie und Praxis evolutionärer Optimierung, Teubner Verlag, Stuttgart, 1994
- [37] *Hensler, F.*; Investitionsanalyse bei Hochbauten, Wirtschaftlichkeits- und Risikoanalyse von Investitionen in Büro- und Geschäftsgebäude Schriftenreihe des Institut für Baubetriebslehre, Universität Stuttgart Bauverlag GmbH Wiesbaden und Berlin
- [38] *Herrera Francisco, Verdegay José Luis*; Genetic Algorithms and Soft Computing, CS-D 779
- [39] *Hirsch, D.; Reimers, K.*; Hochhäuser für die Deutsche Welle, Köln, Bauingenieur 53 (1978), Seiten 365-372
- [40] *Hoffmann M., Kremer P.*; Zahlentafeln für den Baubetrieb, Teubner Verlag, Stuttgart, 1992
- [41] *Hutzelmeier, Greulich*; Baukostenplanung mit Gebäudeelementen, Vollständige Hochbaukosten nach DIN 276, Verlagsgesellschaft Rudopf Müller
- [42] *Idelberger, K.*; Parkrampe in Göttingen, Stahlbau 61 (1992), H. 12, S. 375 ff.
- [43] *Idelberger, K.*; Wendel Parkhaus (Parkrampe) in Lüneburg, Stahlbau 61 (1992), H. 9, Seite 284 ff.
- [44] *J. Kobarg*; Das Münchner Order-Center für Sport und Mode, Stahlbau 61 (1992), H. 7, Seite 193 ff. Münchner Order Center, Stahl und Form, Stahl-Informations-Zentrum, Düsseldorf
- [45] *Jacob Christian*; Principia evolvida ; simulierte Evolution mit Mathematica / 1. Aufl. dpunkt-Verlag, Heidelberg, 1997
- [46] *Jakobs Stefan*; Quantitative Analyse des klassischen genetischen Algorithmus, 1995, Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 1995

- [47] *Jöst, E.; Hanswille, G.; Heddrich, R.; Muess, H.; Williams, D.A.*; Die neue Opel-Lackiererei in Eisenach in feuerbeständiger Verbundbauweise, Stahlbau 61 (1992), H. 8, Seite 225 ff.
- [48] *Jozsef Varga*; Angewandte Optimierung; BI-Wiss.-Verlag, Mannheim, 1991
- [49] *Klingele Martina*; Architektur und Energie, Planungsgrundlagen für Büro- und Verwaltungsbauten, Verlag C.F.Müller, 1994
- [50] *Kordina K., Meyer-Ottens, C.*; Beton-Brandschutz-Handbuch, Beton-Verlag, Düsseldorf, 1981
- [51] *Kosmol Peter*; Optimierung und Approximation; Berlin [u.a.] ; de Gruyter, 1991
- [52] *Lieberum, P.*; Tiefgarage in Stahlverbundbauweise, Hannover, Stahlbau 56 (1987), H. 3, Seite 65
- [53] *Linse, D., Thielen G.*; Grundlagen der Biegebemessung der DIN 1045 aufbereitet für Rechenanlagen, Beton- und Stahlbetonbau 9/1972
- [54] *Littger Kurt*; Optimierung, eine Einführung in rechnergestützte Methoden und Anwendungen, Springer Verlag, Berlin, 1992
- [55] *Lünser Heiko*; Ökobilanzen im Brückenbau ; eine umweltbezogene, ganzheitliche Bewertung; Birkhäuser, Basel, 1999
- [56] *Markos Papageorgiou*; Optimierung ; statische, dynamische, stochastische Verfahren für die Anwendung; Oldenbourg-Verlag, München, 1991
- [57] *Masconi, H.-W.; Muess, H.; Schmitt, H.; Seidel, U.*; Schraubenloser Verbundbau beim Neubau des Postamtes 1 in Saarbrücken, Stahlbau 59 (1990), H. 3, Seite 65 ff.
- [58] *Michalewicz Zbigniew*; Genetic algorithms + data structures = evolution programs; Springer-Verlag, Berlin, 1996
- [59] *Mitchell Melanie*; "Simulierte Evolution"; ein Lösungsansatz für Formfindungsprobleme?; Berichte aus dem Konstruktiven Ingenieurbau ; 96,7 München, Techn. Univ., Diss., 1996
- [60] *Mitchell Melanie*; An introduction to genetic algorithms, Cambridge, Mass. [u.a.] ; MIT Press, 1996
- [61] *Möller D.*; Planungs- und Bauökonomie, 3.Auflage, Oldenburg Verlag 1996
- [62] *Muess, H.*; Anwendung der Verbundbauweise am Beispiel der neuen Opel-Lackiererei in Rüsselsheim, Stahlbau 51 (1982), H. 3, Seite 65 ff.
- [63] *Neufert E.*; Bauentwurfslehre, Vieweg und Sohn, Braunschweig, 1984
- [64] *Nieswandt Aribert*; Operations-Research, Oldenbourg-Verlag, München, 1994
- [65] *Olsen, G.*; Bauleistungen und Baupreise für schlüsselfertige Wohnhausbauten; Schiele und Schön, Berlin, 1992
- [66] *Österle Eberhard*; Wirtschaftlichkeit bautechnischer Energiesysteme von Büro- und Verwaltungsbauten ; wärmeschutztechn. Baukonstruktionen ; Anlagen zur Raumkonditionierung ; Beleuchtungsanlagen; Bauverlag, Wiesbaden, 1985
- [67] *Papageorgiou M.*; Optimierung, Oldenbourg-Verlag, 1992
- [68] *Philippe Vincke.*; Multicriteria decision-aid; Chichester [u.a.] ; Wiley, 1992
- [69] *Pistohl Wolfram*; Handbuch der Gebäudetechnik, Werner-Verlag, Düsseldorf, 1996
- [70] Planen und Bauen mit Stahl/Beton-Verbund; Tagung Stuttgart/9. Nov. 1994, VDI-Bericht 1167, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1994
- [71] *Rechenberg Ingo*; Evolutionsstrategie ; Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution, Frommann-Holzboog, Stuttgart-Bad Cannstadt, 1973
- [72] *Rinza, P.; Schmitz, H.*; Nutzwert-Kosten-Analyse, 2.Auflage 1992, VDI-Verlag Düsseldorf
- [73] *Roik, K. u.a.*; Verbundkonstruktionen, Bemessung auf der Grundlage des Eurocode 4, Teil 1 Betonkalender 1993, S. 551 ff.
- [74] *Rudolph S.*; Eine Methodik zur systematischen Bewertung von Konstruktionen, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1995
- [75] *Saliger E.*; Betriebswirtschaftliche Entscheidungstheorie, 3. Auflage, Oldenburg Verlag, 1993

- [76] *Schmitt O.*; Schaltechnik im Ortbetonbau, Werner-Verlag, 1993
- [77] *Schneider K.-J.*; Bautabellen für Architekten, 12. Auflage 1997, Werner Verlag
- [78] *Schneider K.-J.*; Bautabellen, 13. Auflage 1997, Werner Verlag
- [79] *Schöneburg Eberhard; Heinzmann Frank; Feddersen Sven*; Genetische Algorithmen und Evolutionsstrategien ; eine Einführung in Theorie und Praxis der simulierten, 1. Aufl., 2., unveränd. Nachdr. Bonn [u.a.] ; Addison-Wesley, 1996
- [80] *Schwefel H.P., Kursawe F.*; Künstliche Evolution als Modell für natürliche Intelligenz, Um-druck Universität Dortmund, Fachbereich Informatik, Lehrstuhl für Systemanalyse, 1992
- [81] *Schwefel H.P.*; Evolutionsstrategie und numerische Optimierung, Technische Universität Berlin, Diss., 1975
- [82] *Siegel Curt, Wonneberg Rudolf + Partner*; Bau- und Betriebskosten von Büro- und Verwaltungsbauten ; eine Auswertung der Daten von 110 ausgeführten und in Betrieb ge-nommenen Gebäuden, Bauverlag, Wiesbaden ; 1977
- [83] *Sieverts E.*; Bürohaus und Verwaltungsbauten, Kohlhammervlag, Stuttgart, 1980
- [84] *Simons Klaus; Sager Rainer*; Berechnungsmethoden für Baunutzungskosten; Bonn ; Bundesmin. f. Raumordnung, Bauwesen u. Städtebau, , 04.063, 1980
- [85] *Sommer, R.*; Kostensteuerung von Hochbauten, Bauverlag GmbH, Wiesbaden – Berlin, 1983
- [86] Stahl im Hochbau, Band II, Teil 1, Verlag Stahleisen, Düsseldorf 1987
- [87] Stahl/Beton-Verbundkonstruktion am Beispiel des Verwaltungsgebäudes der Harpener AG, Dortmund, Stahl und Form, Stahl-Informationszentrum Düsseldorf.
- [88] Statistisches Bundesamt Wiesbaden, Statistische Jahrbücher 1992 - 1998
- [89] *Steuer Ralph E.*; Multiple criteria optimization ; theory, computation, and application; New York [u.a.] ; Wiley, 1986
- [90] *Varga J.*; Angewandte Optimierung, BI-Wiss.-Verlag.; 1991
- [91] Verbundtragwerke aus Stahl und Beton, DIN Taschenbuch, Berlin, Beuth-Verlag, 1994
- [92] *Voget Stefan*; A genetic algorithm approach to periodic programs / Karl Nachtigall;. Uni-versität Hildesheim, Institut für Mathematik, 1993
- [93] *Voget Stefan*; Aspekte genetischer Optimierungsalgorithmen ; mathematische Modellie-rung und Einsatz in der Fahrplanerstellung; Hildesheim, Univ., Diss., 1995
- [94] Zentralverband des Deutschen Baugewerbes; Jahrbuch des Deutschen Baugewerbes, Ausgabe 1992 - 1998
- [95] Zentrum für Produktionstechnik der Technischen Universität Berlin und der Fraunhofer Gesellschaft, Stahl und Form, Stahl-Informationszentrum Düsseldorf.

## Verwendete Normen

- [1] DIN 1045, Beton- und Stahlbeton
- [2] DIN 1055, Lastannahmen für Bauten
- [3] DIN 18800, Stahlbauten
- [4] DIN 276, Kosten im Hochbau, Juni 1993
- [5] DIN 4102, Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen
- [6] DIN 4108, Wärmeschutz im Hochbau
- [7] DIN EN 832; Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden
- [8] Eurocode 2, Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken
- [9] Eurocode 3, Tragwerke aus Stahl
- [10] Eurocode 4, Verbundtragwerke aus Stahl und Beton

---

## **ANHANG**

---

## A 1 Statistische Auswertung der Bauwirtschaft (1990-1996)

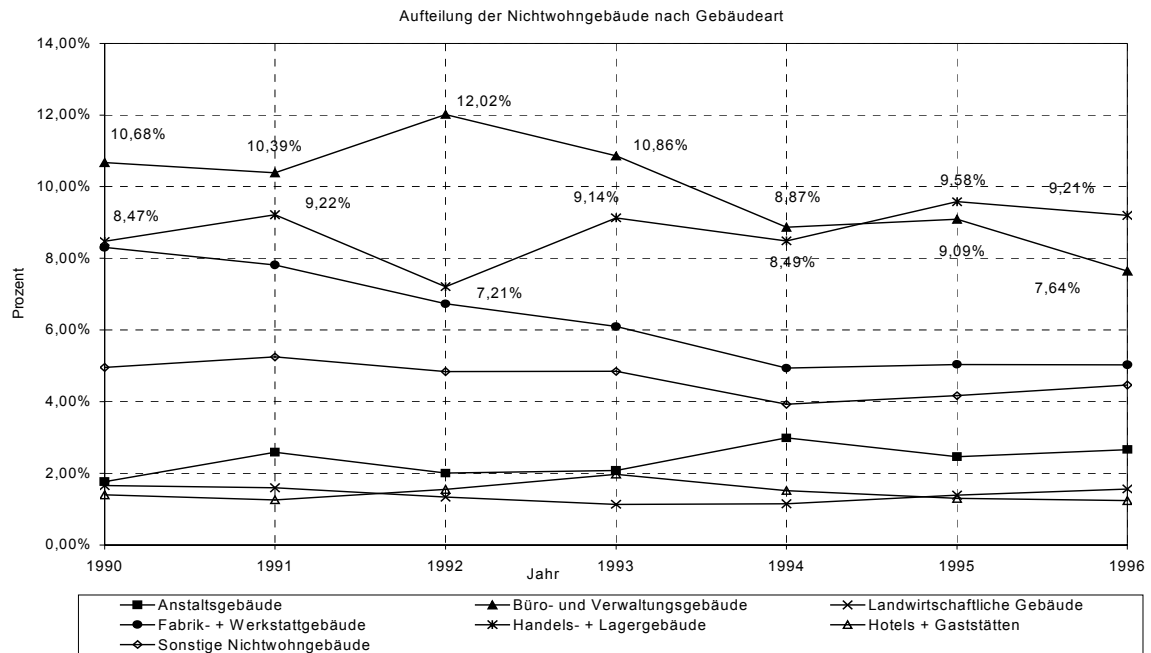


Abbildung A 1: Aufteilung Nichtwohngebäude

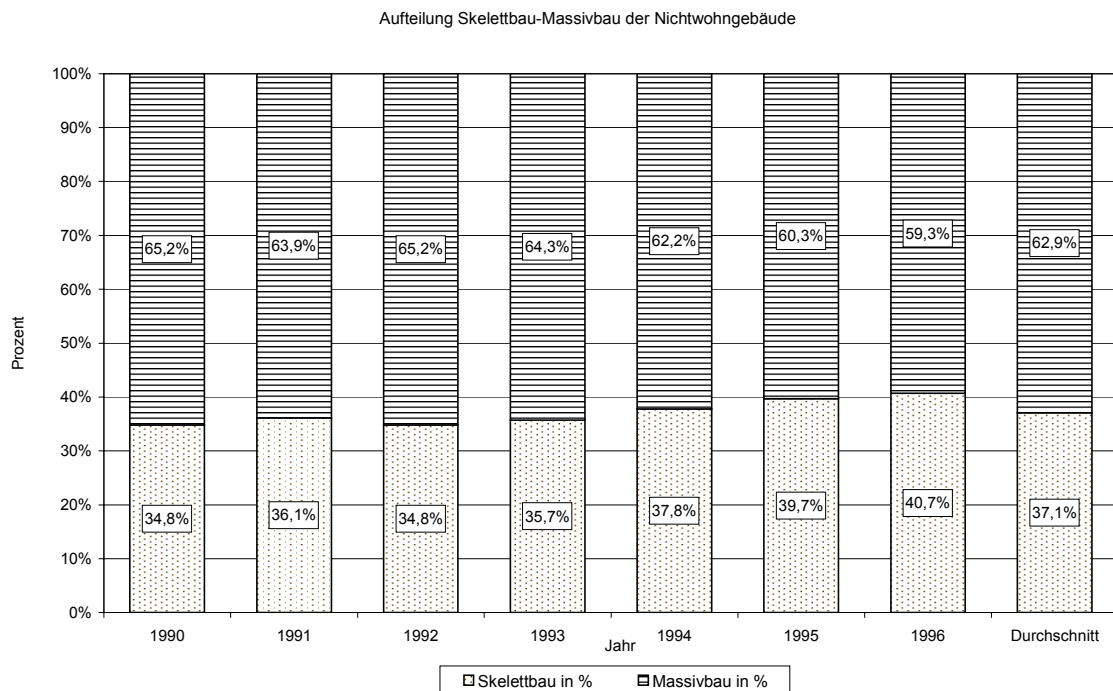


Abbildung A 2: Aufteilung der Nichtwohngebäude in Massiv- und Skelettbauten

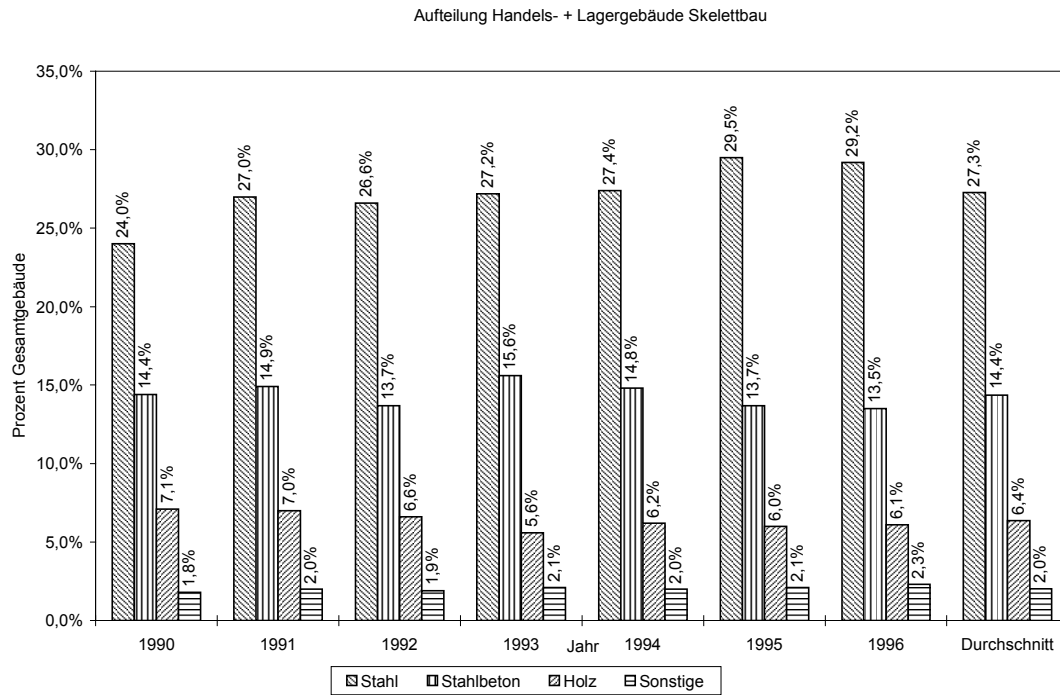


Abbildung A 3: Aufteilung Handels- und Lagergebäude in Skelettbauweise auf versch. Konstruktionsarten

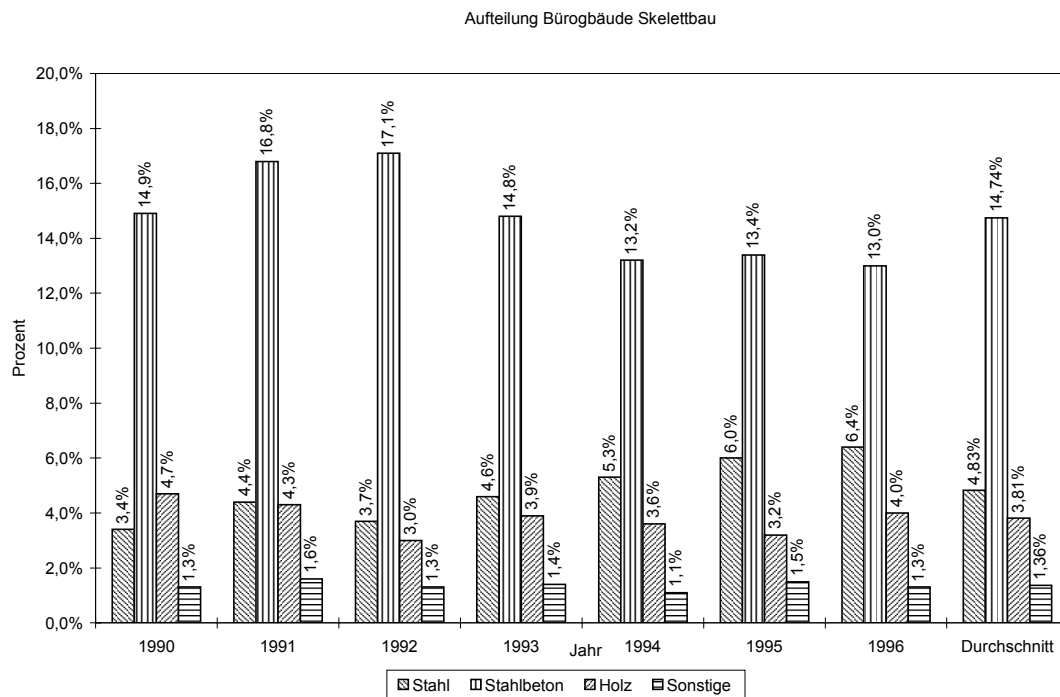


Abbildung A 4: Aufteilung Büro- und Verwaltungsgebäude in Skelettbauweise auf verschiedene Konstruktionsarten



## A 2 Ergebnisse Beispiel Entwurfsoptimierung

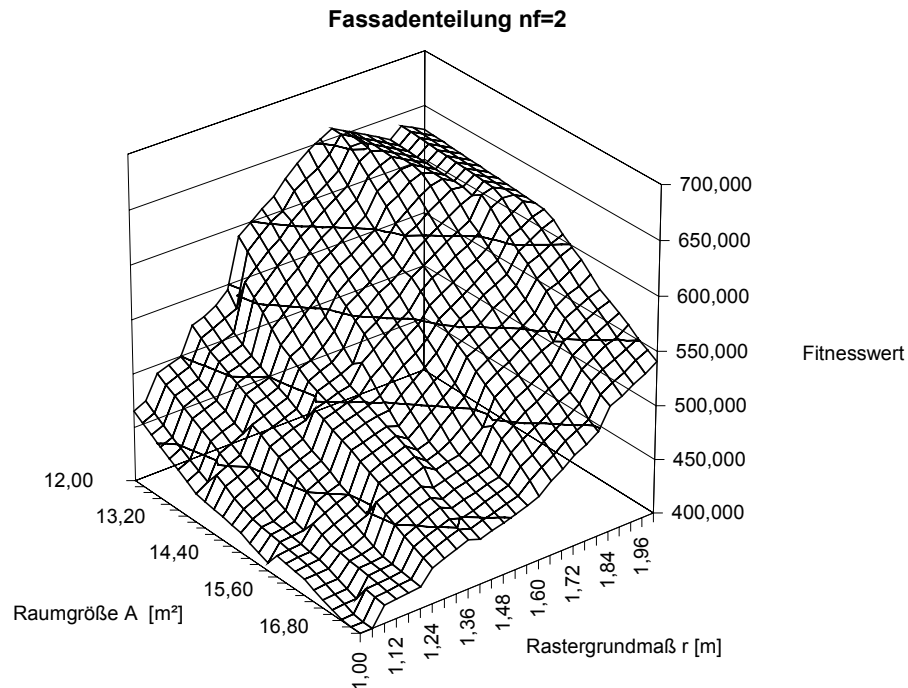


Abbildung A 5: Berechnungsergebnisse für  $nf=2$

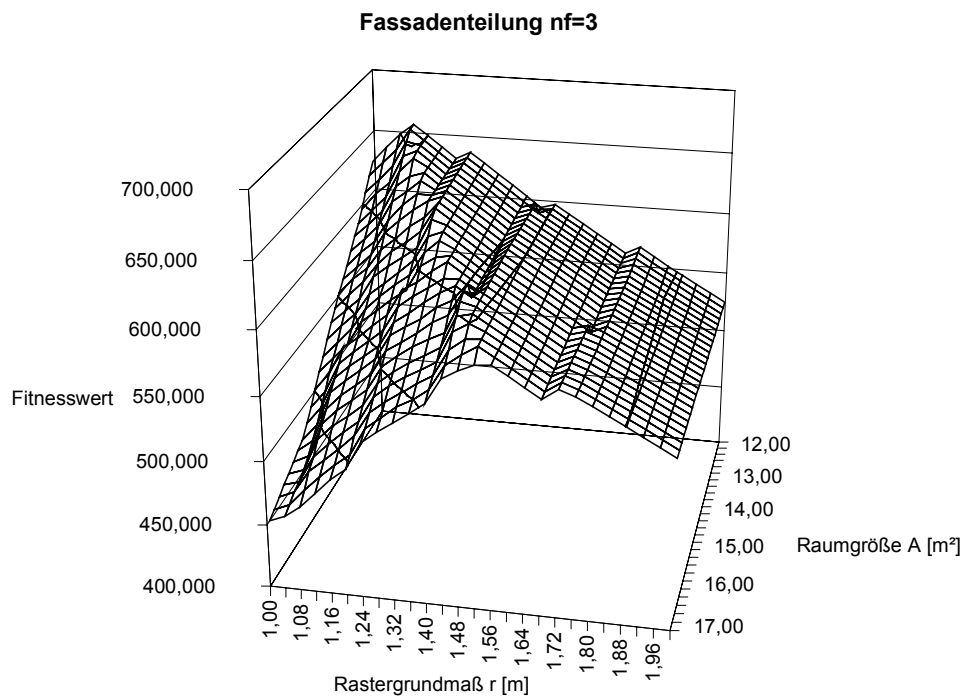


Abbildung A 6: Berechnungsergebnisse für  $nf=3$

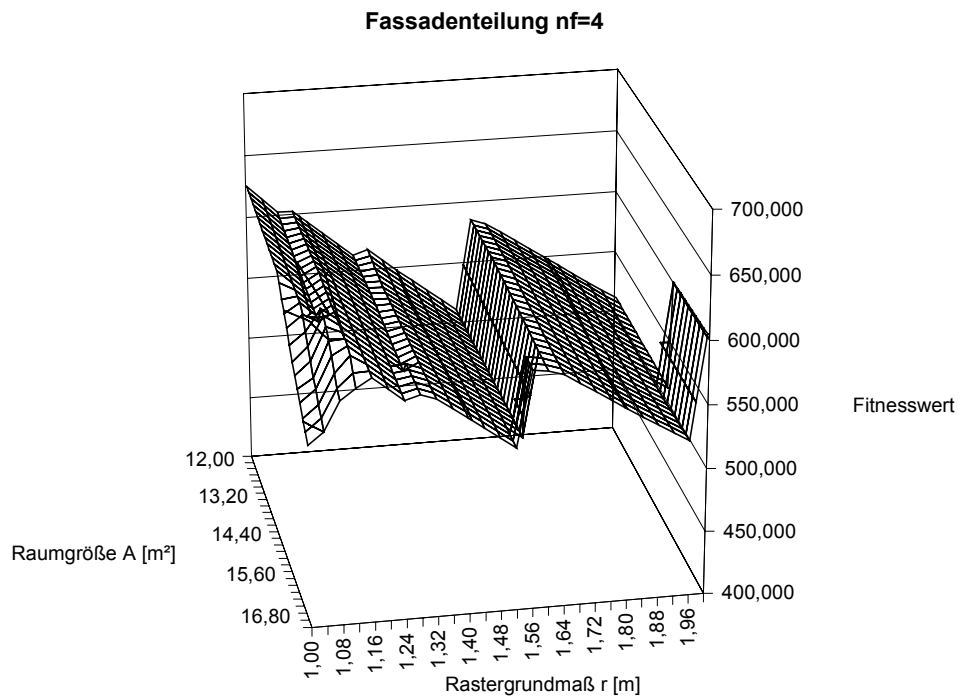


Abbildung A 7: Berechnungsergebnisse für  $nf=4$

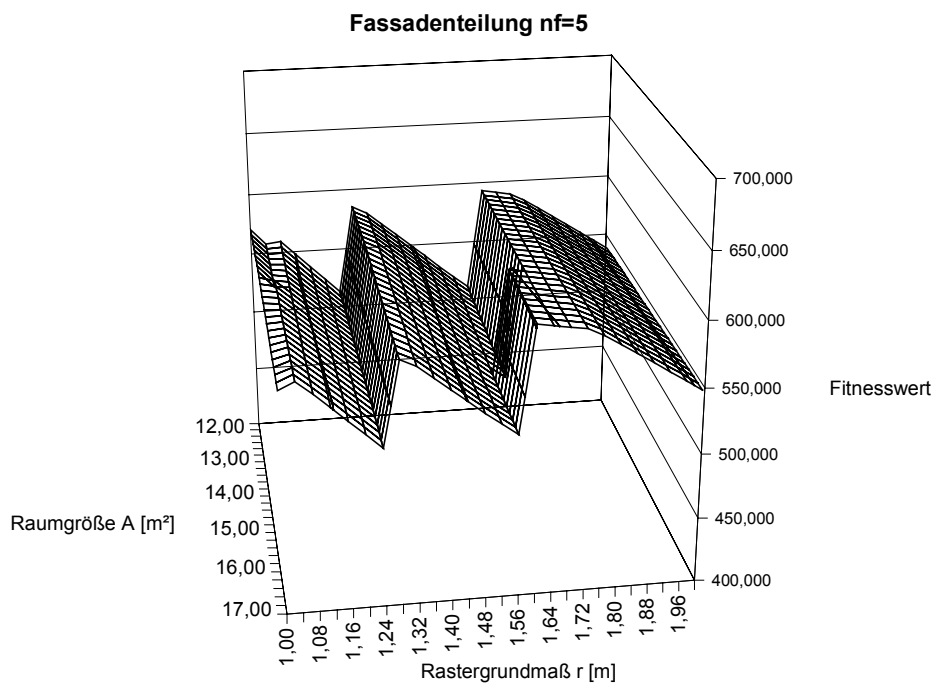


Abbildung A 8: Berechnungsergebnisse für  $nf=5$

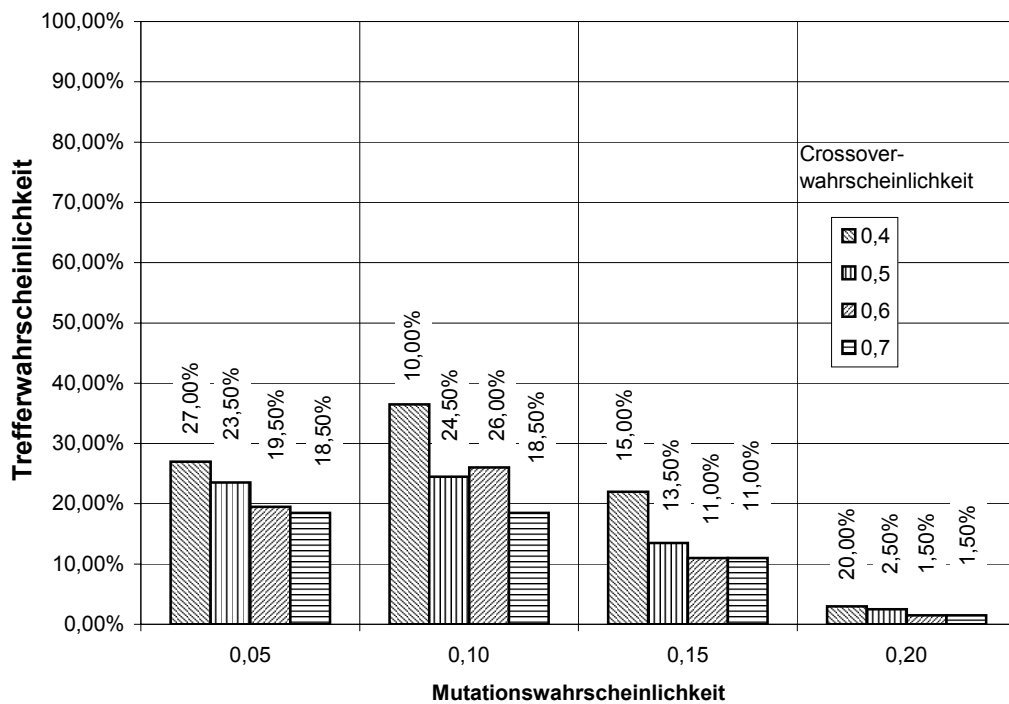


Abbildung A 9: Auswertung 20/50/Standard-Binärcode/1-Point-XO

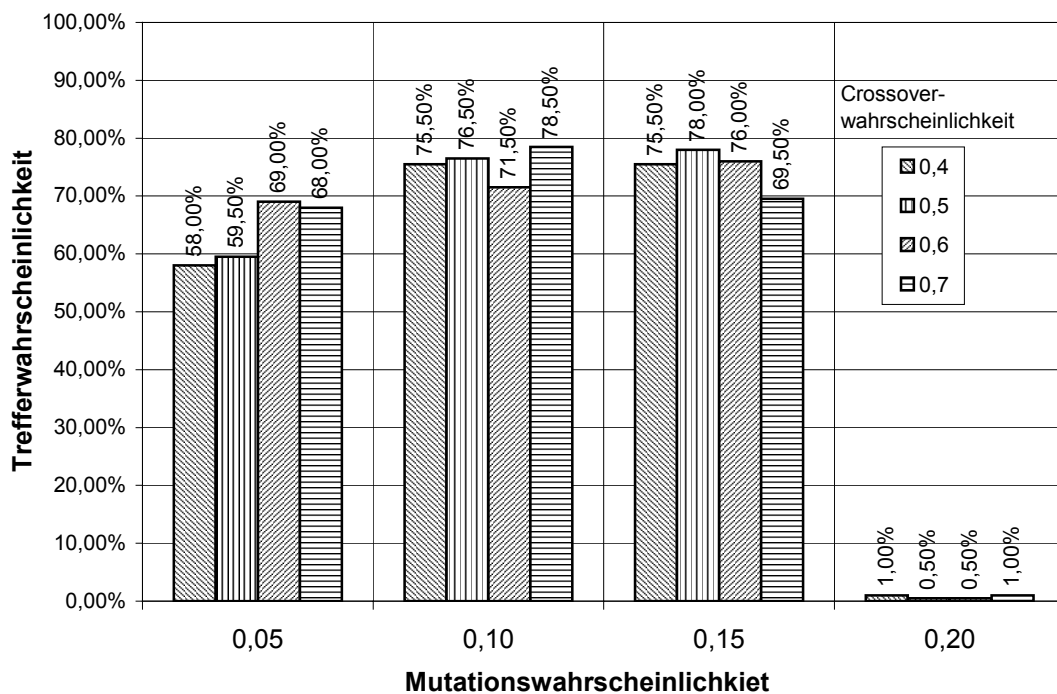


Abbildung A 10: Auswertung 20/50/Standard-Binärcode/n-Point-XO

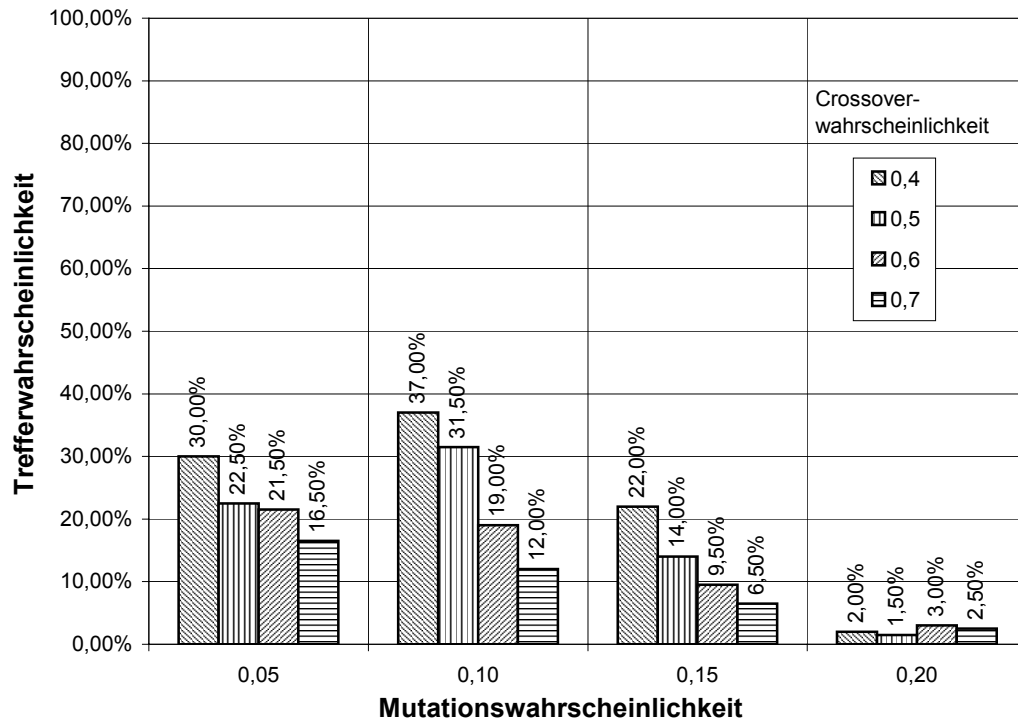


Abbildung A 11: Auswertung 20/50Graycode/1-Point-XO

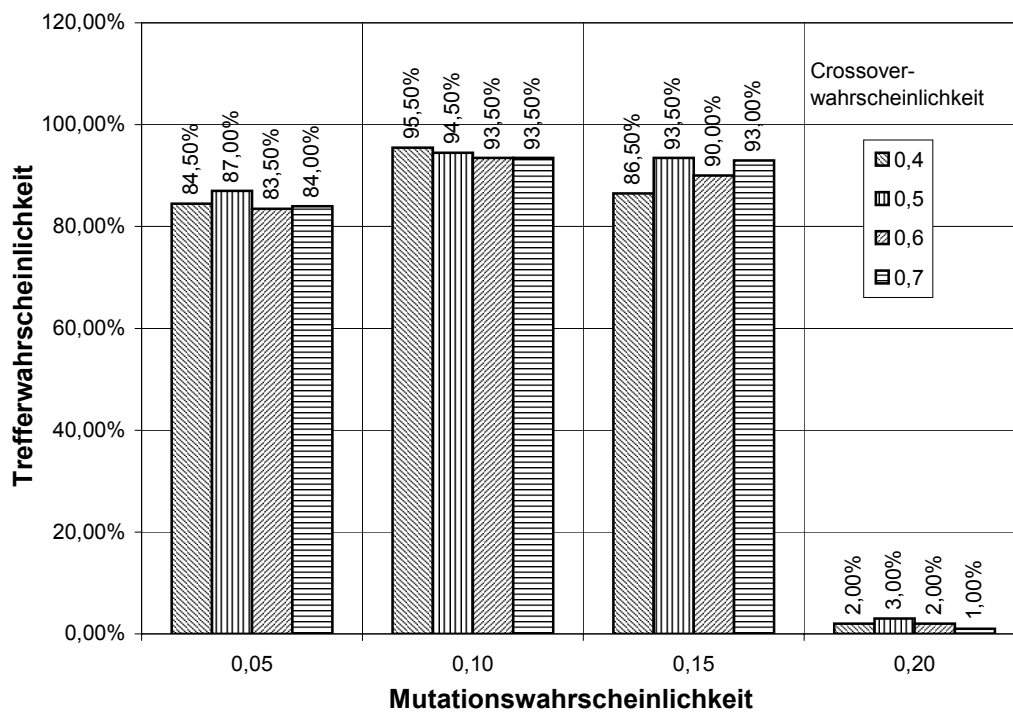


Abbildung A 12: Auswertung 20/50/Graycode/n-Point-XO

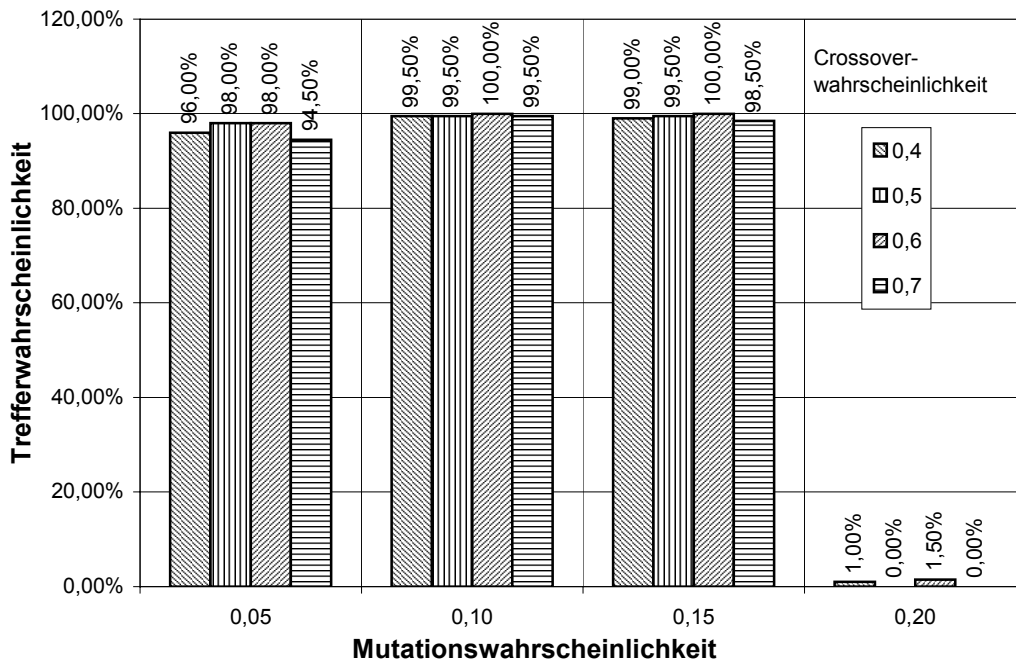


Abbildung A 13: Auswertung 40/50/Graycode/n-Point-XO

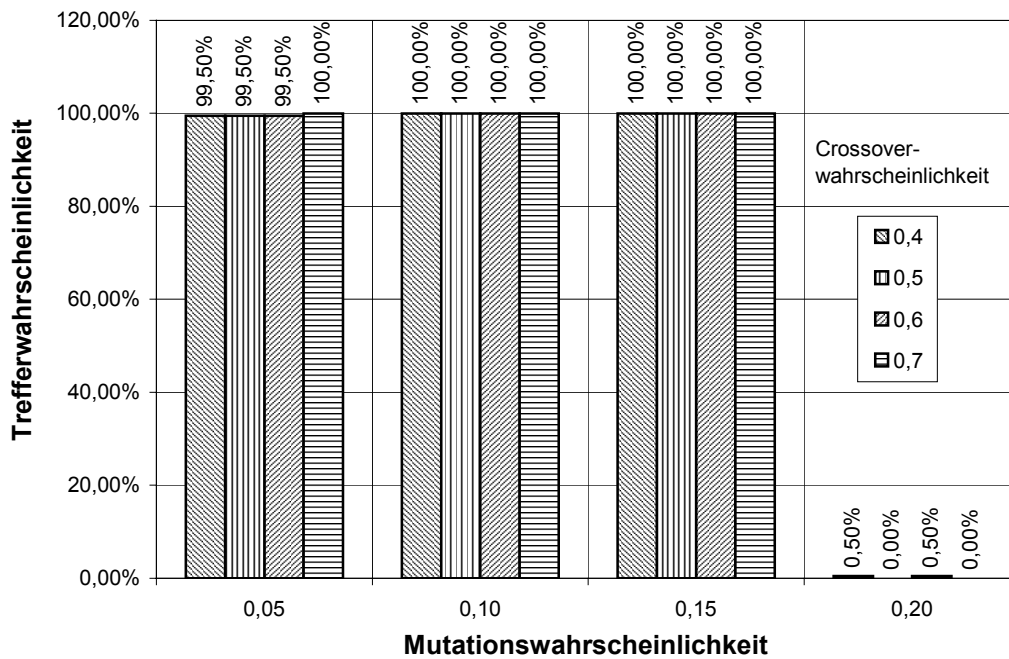


Abbildung A 14: Auswertung 60/50/Graycode/n-Point-XO

### A 3 Berechnung Gebäudegeometrie

Am Beispiel eines Kombibüros ohne Tiefgarage wird die prinzipielle Vorgehensweise zur Berechnung der Geometrie erläutert. Alle anderen in Tabelle 5-5 aufgelisteten Geometrien sind entsprechend hergeleitet und in der Software integriert.

#### A 3.1 Allgemeines

Die Berechnung des Modulquerschnitts hängt allgemein von der Bürostruktur, der Stützenstellung, der Stellung der Außenstütze, der Raumtiefe, der Trennwanddicke, der Stellung der Innenstütze und der Flurbreite ab. Bei Anordnung von elementierten Trennwänden spielen das Rastergrundmaß und die Rasterart ebenfalls eine Rolle, da in diesem Fall der Gebäudequerschnitt gerastert wird. Das heißt, dass Raumtiefe + 0,5\*Trennwanddicke, 0,5\*Trennwanddicke + Flurbreite und Breite der Gemeinschaftszone Vielfache des Rastergrundmaßes sind.

Die Gemeinschaftszone in der Mitte wird in Abhängigkeit der vorgegebenen Entwurfparameter berechnet:

- Bürofläche der einzelnen Büros,
- Anzahl der Arbeitsplätze pro Geschoss,
- vorgegebener Flächenbedarf pro Arbeitsplatz.

Weiterhin wird angenommen, dass die Büros zu beiden Seiten an der Fassade angeordnet sind.

Somit ergibt sich die Breite der Gemeinschaftszone zu

$$l_{gem} = \frac{AP \cdot AAP}{bstr} - 2 \cdot tstr \quad (Gl. A 1)$$

*l<sub>gem</sub>..... Breite Gemeinschaftszone Kombibüro*  
*AP..... Anzahl der Arbeitsplätze*  
*AAP..... Flächenbedarf pro Arbeitsplatz*  
*bstr..... Breite Standardraum*  
*tstr..... Tiefe Standardraum*

Weiterhin wird für die Gemeinschaftszone eine Mindestbreite von 3,50 m angenommen.

Bei Kombibüros ohne Tiefgarage sind vier verschiedene Stützenstellungen möglich:

- st=1    einfeldiges System
- st=3    zweifeldiges System mit symmetrischer Stützenstellung
- st=4    zweifeldiges System mit asymmetrischer Stützenstellung
- st=9    dreifeldiges System

Die Berechnung der jeweiligen Stützweiten wird im folgenden beschrieben.

Allgemein berechnet sich die Breite des Grundmoduls zu

$$b_{GM} = -2 \cdot l_{fas} + l_1 + l_2 \quad (Gl. A 2)$$

*b<sub>GM</sub>..... Breite Grundmodul*  
*l<sub>fas</sub>..... Abstand Stützenachse Fassade*  
*l<sub>1</sub>..... Spannweite 1 Modulquerschnitt*  
*l<sub>2</sub>..... Spannweite 2 Modulquerschnitt*

Die Breite des Grundmoduls wird als lichte Breite zwischen den beiden Längsfassaden definiert. Die Variable *l<sub>fas</sub>* wird entsprechend der Vorzeichendefinition (siehe Kapitel 5) berücksichtigt.

### A 3.2 Einfeldiges System

$$l_1 = 2 \cdot (l_{fas} + t + twd + flurb) + l_{gem} \quad (Gl. A 3)$$

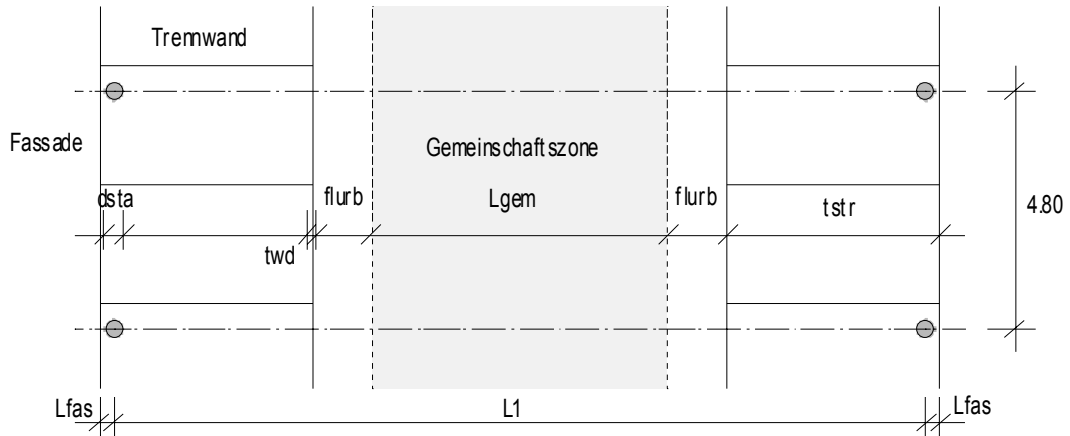


Abbildung A 15: Querschnitt einfeldiges System  $st=1$

### A 3.3 Zweifeldiges, symmetrischen System

$$l_1 = l_{fas} + t + twd + flurb + \frac{l_{gem}}{2} = l_2 \quad (Gl. A 4)$$

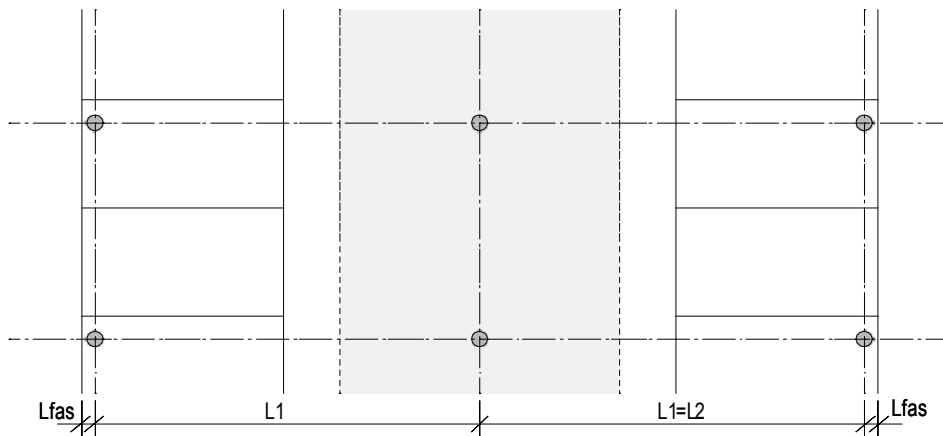


Abbildung A 16: Zweifeldiges System mit symmetrischer Stützweite

### A 3.4 Zweifeldiges, asymmetrisches System

Bei der asymmetrischen Anordnung der Innenstütze wird die Innenstütze am Rand der Gemeinschaftszone angeordnet. Die Stützweiten  $l_1$  und  $l_2$  berechnen sich zu:

$$l_1 = l_{fas} + tstr + twd + flurb + \frac{dsti}{2} \quad (Gl. A 5)$$

$$l_2 = l_{fas} + tstr + twd + flurb + l_{gem} + \frac{dsti}{2} \quad (Gl. A 6)$$

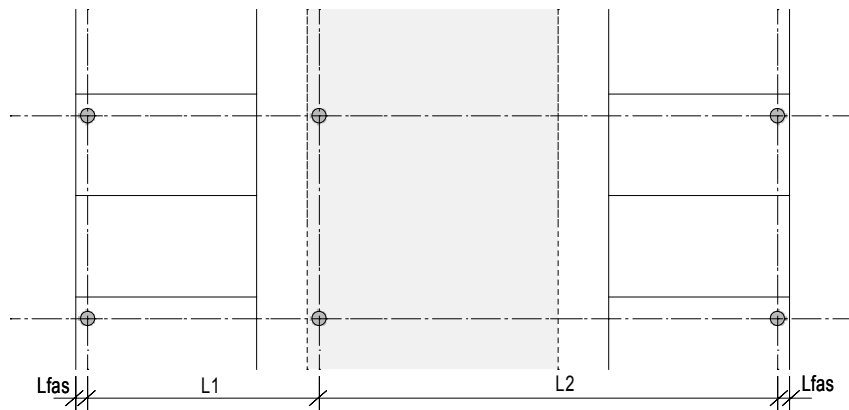


Abbildung A 17: Zweifeldiges System mit asymmetrischer Stützweite

### A 3.5 Dreifeldiges System

#### A 3.5.1 Innenstütze im Flur

$$l_1 = l_{fas} + tstr + twd + flurb + astitw + \frac{dsti}{2} \quad (Gl. A 7)$$

$$l_2 = l_{gem} + 2 \cdot flurb + dsti \quad (Gl. A 8)$$

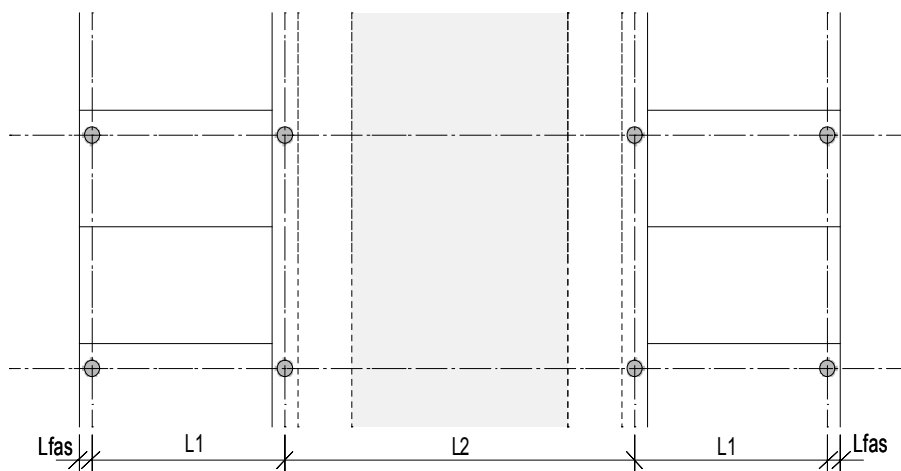


Abbildung A 18: Dreifeldiges System, Innenstütze auf Flurseite



### A 3.5.2 Innenstütze in Schrankwand

$$l_1 = l_{fas} + t_{str} - \frac{dsti}{2} \quad (Gl. A 9)$$

$$l_2 = l_{gem} + 2 \cdot flurb + dsti + 2 \cdot twd \quad (Gl. A 10)$$

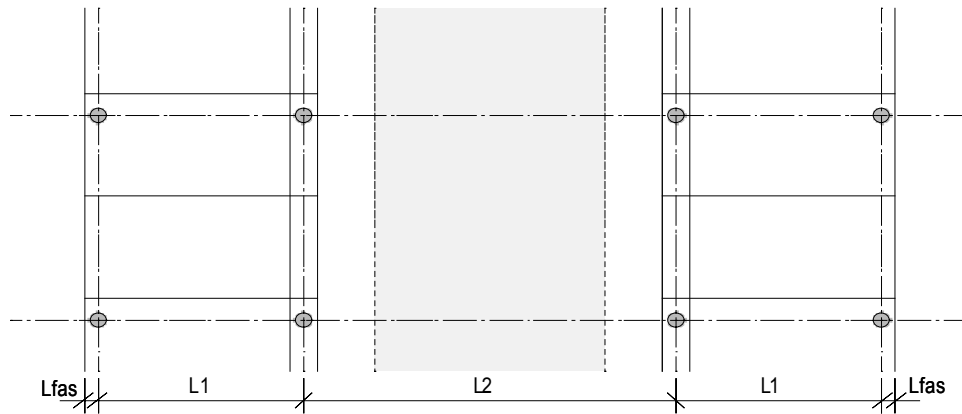


Abbildung A 19: Dreifeldiges System, Innenstütze in Schrankwand

### A 3.5.3 Innenstütze in Trennwand

$$l_1 = l_{fas} + t_{str} + \frac{twd}{2} \quad (Gl. A 11)$$

$$l_2 = l_{gem} + 2 \cdot \left( \frac{twd}{2} + flurb \right) \quad (Gl. A 12)$$

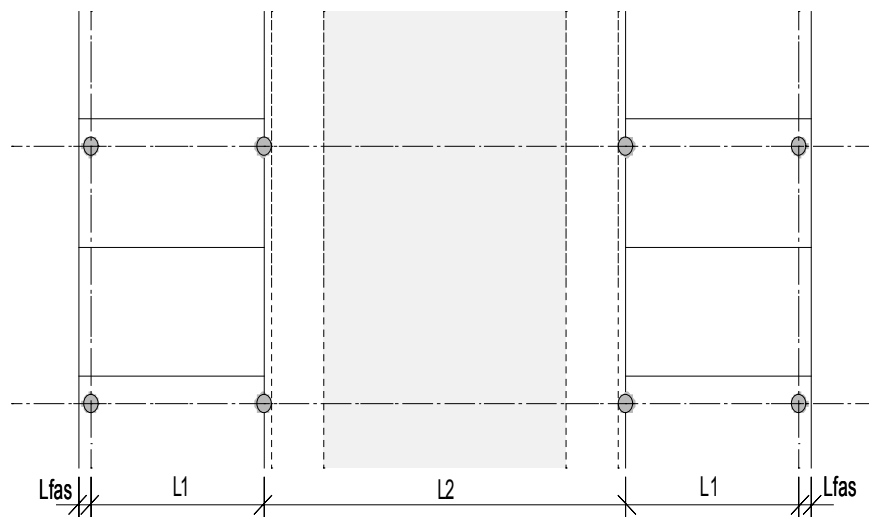


Abbildung A 20: Dreifeldiges System, Innenstütze mittig in Trennwand

#### A 3.5.4 Innenstütze in Gemeinschaftszone

$$l_1 = l_{fas} + t_{str} + twd + flurb + \frac{dsti}{2} \quad (Gl. A 13)$$

$$l_2 = l_{gem} - \frac{dsti}{2} \quad (Gl. A 14)$$

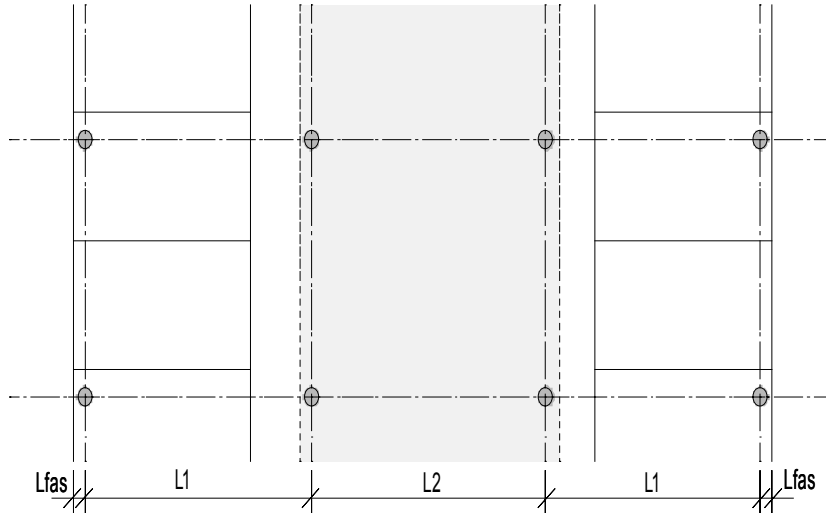


Abbildung A 21: Dreifeldiges System, Innenstütze auf anderer Flurseite

#### A 3.5.5 Innenstütze im Büro

$$l_1 = l_{fas} + t - astitw - \frac{dsti}{2} \quad (Gl. A 15)$$

$$l_2 = l_{gem} + 2 \cdot (flurb + twd + astitw + \frac{dsti}{2}) \quad (Gl. A 16)$$

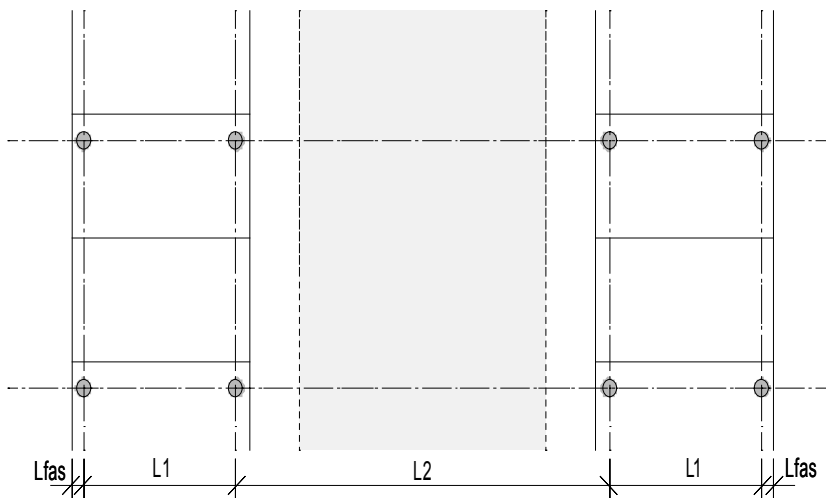


Abbildung A 22: Dreifeldiges System, Innenstütze auf Büroseite

### A 3.6 Berechnung Modullängsschnitt

Die Berechnung der Längsgeometrie ist von folgenden Parametern abhängig:

- *Ra* Rasterart (Eingabeparameter)
- *Geo* Auswahl der Längsgeometrie (Eingabeparameter)
- *Aorg1* Anzahl der Räume pro Geschoss / Organisationseinheit. (Eingabeparameter)
- *nl* Anzahl der Raster über die gesamte Länge
- *nk* Anzahl der Konstruktionsachsen
- *nb* Anzahl der Raster je Stützweite (Eingabeparameter)

In einem ersten Schritt wird die maximale Anzahl der Raster in Gebäudelängsrichtung ermittelt.

#### A 3.6.6 Berechnung Geschosshöhe und Gesamthöhe Grundmodul

Bei der Berechnung der Gesamthöhe des Grundmoduls wird der Gebäudeschnitt in vier verschiedene Höhenzonen, Kellergeschoss, Erdgeschoss, Normalgeschosse und Dachgeschoss, eingeteilt.

Die Geschosshöhe besteht aus einzelnen Elementen von Fußbodenaufbau, lichte Raumhöhe, Unterdecke und Deckenkonstruktion. In Abhängigkeit verschiedener Deckenkonstruktionen und Stützenstellungen wird die Geschosshöhe berechnet. Es wird hierbei folgende Vereinbarung getroffen, dass bei einer Konstruktion mit Unterzügen in Gebäudelängsrichtung und bei Anordnung der Außenstütze innen an der Fassade kein Unterzug, sondern ein als Brüstungsträger ausgebildeter Überzug ausgeführt wird. Dies hat zur Folge, dass die lichte Raumhöhe bis Unterkante Decke und nicht bis Unterkante Unterzug gerechnet werden kann. Da die erforderliche lichte Raumhöhe auch aus der Bedingung der natürlichen Belichtung heraus ermittelt wird, wirkt sich diese Annahme positiv durch eine geringere erforderliche Geschosshöhe aus.

Die einzelnen Berechnungsarten sind in nachstehender Abbildung dargestellt.

Die Anzahl der Geschosse wird über die Ausbildung des Erdgeschosses als Sonder- oder Bürogeschoss und über die maximal vorgegebene Anzahl der Büros im Büromodul berechnet. In der Regel ist die maximale Büroanzahl ein Vielfaches der Anzahl der Büros pro Geschoss. Die Höhe des Grundmoduls ist definiert als die Summe der Geschosshöhen ab Oberkante Keller. In nachstehender Abbildung ist dieser Zusammenhang dargestellt.

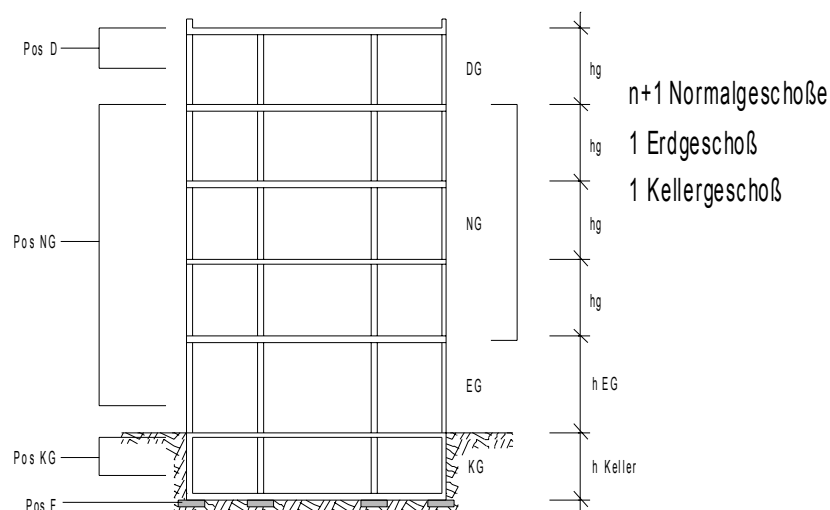


Abbildung A 23: Allgemeiner Vertikalschnitt

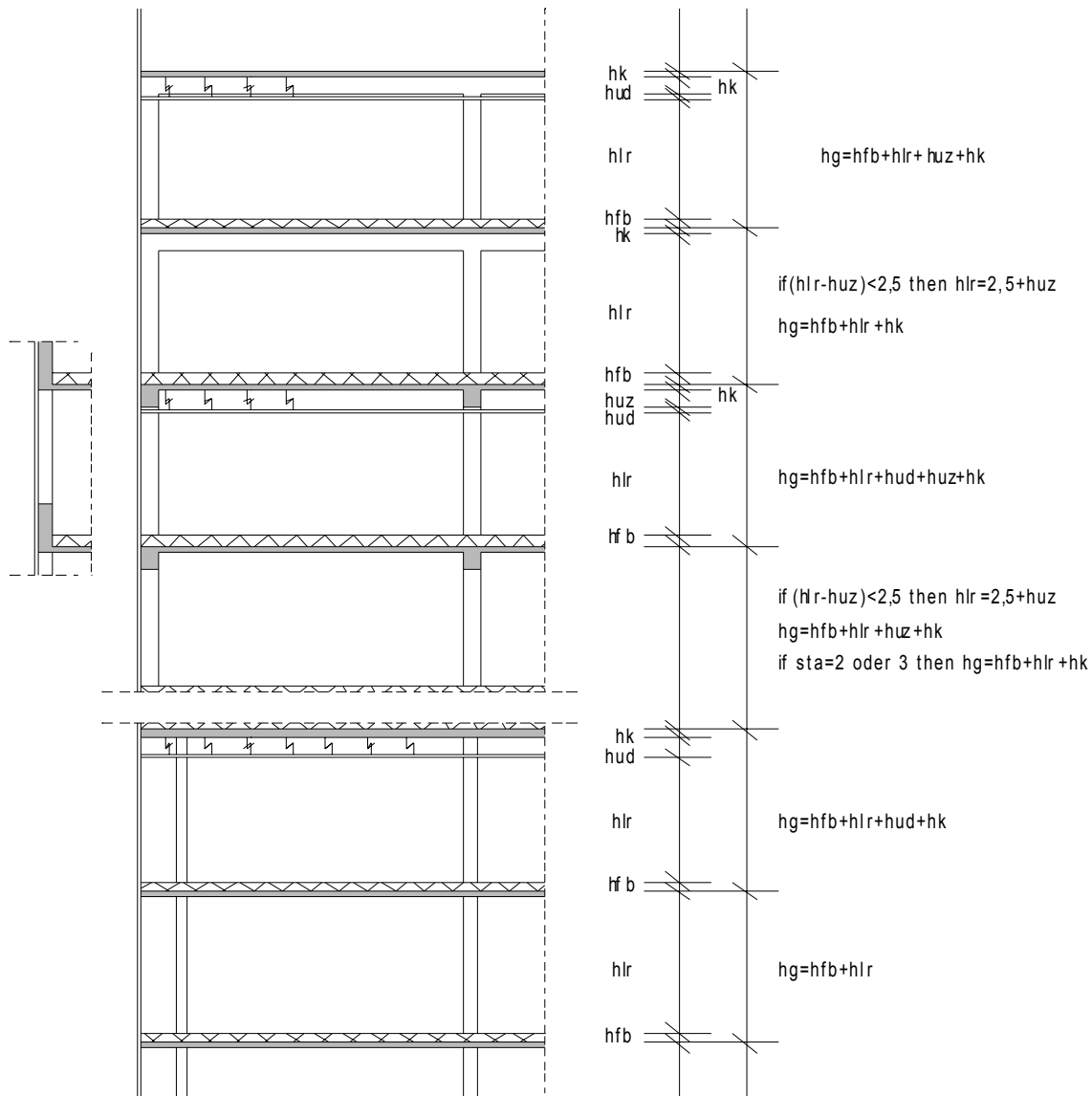


Abbildung A 24: Berechnung der Geschosshöhe

Die Höhe des Grundmoduls berechnet sich zu

$$h_{GM} = g_z \cdot h_g + h_{EG}$$

(Gl. A 17)

$h_{GM}$ ..... Höhe Grundmodul  
 $g_z$ ..... Anzahl der Normalgeschosse  
 $h_g$ ..... Geschosshöhe Normalgeschoß  
 $h_{EG}$ ..... Geschosshöhe Erdgeschoss

Diese Höhe ist für weitergehende Berechnungen wie für die Berechnung der Herstellkosten von Bedeutung. Die Höhe des Grundmoduls wird für die Berechnung der Fassadenfläche und somit für die Berechnung der Herstellkosten (Längsfassade) benötigt.

Infolge des Brandschutzes wird die Höhe des Grundmoduls auf maximal 30,0 m beschränkt und es werden inklusive Erdgeschoss nicht mehr als sieben Vollgeschosse zugelassen.

## A 4 Einheitspreise für Kostenberechnung

Die für die Kostenberechnung verwendeten Einheitspreise sind in den folgenden Tabellen nach Bauteilen sortiert zusammengestellt. Die Werte sind aus der Literatur und aus der Auswertung verschiedener gebauter Projekte entnommen. Darüber hinaus sind die Kostendaten mit Hilfe des Baupreisindex auf den Stand von 1998 umgerechnet worden.

### A 4.1 Einheitspreise Rohbau

Beschreibung	Einheit	Einheitspreis
Mutterboden abtragen	[m <sup>2</sup> ]	2,70 DM
Mutterboden abtragen, laden und abfahren	[m <sup>2</sup> ]	20,00 DM
Bodenaushub, BKL. 3-5, seitlich lagern	[m <sup>3</sup> ]	7,30 DM
Bodenaushub, BKL. 3-5, laden und abfahren	[m <sup>3</sup> ]	25,00 DM
Deponiegebühren	[m <sup>3</sup> ]	15,00 DM
Baugrube verfüllen	[m <sup>3</sup> ]	15,00 DM
Mutterboden einbauen und verdichten	[m <sup>3</sup> ]	5,60 DM

*Tabelle A 1: Einheitspreise Baugrube*

Beschreibung	Einheit	Einheitspreis
Beton	[m <sup>3</sup> ]	227,00 DM
Betonstabstahl	[t]	2265,00 DM
Schalung	[m <sup>2</sup> ]	70,00 DM
Sauberkeitsschicht 10 cm	[m <sup>2</sup> ]	2,70 DM

*Tabelle A 2: Einheitspreise Einzelfundament*

Beschreibung	Einheit	Einheitspreis
Bewehrtes Streifenfundament Giebelwand 80/50 cm	[lfm]	167,00 DM
Bewehrtes Streifenfundament Längswand 50/50 cm	[lfm]	221,00 DM

*Tabelle A 3: Einheitspreise Streifenfundament*

Beschreibung	Einheit	Einheitspreis
Beton	[m <sup>3</sup> ]	227,00 DM
Betonmattenstahl	[t]	2070,0 DM
Trennfolie	[m <sup>2</sup> ]	3,00 DM
Kieslage 20cm	[m <sup>2</sup> ]	12,50 DM

*Tabelle A 4: Einheitspreise Sohlplatte*

Beschreibung	Einheit	Einheitspreis
Beton	[m <sup>3</sup> ]	237,00 DM
Betonstabstahl	[t]	2265,00 DM
Betonmattenstahl	[t]	2450,00 DM
Schalung	[m <sup>2</sup> ]	97,40 DM

*Tabelle A 5: Einheitspreise Stirnwand*

Beschreibung	Einheit	Einheitspreis
Beton	[m³]	237,00 DM
Betonstabstahl	[t]	2265,00 DM
Betonmattenstahl	[t]	2450,00 DM
Schalung	[m²]	97,40 DM

Tabelle A 6: Einheitspreise Kellerwand

Beschreibung	Einheit	Einheitspreis
Beton	[m³]	306,00 DM
Betonstabstahl	[t]	2265,00 DM
Schalung	[m²]	119,00 DM

Tabelle A 7: Einheitspreise Stahlbetonstütze

Beschreibung	Einheit	Einheitspreis
Kammerbeton	[m³]	230,00 DM
Betonstabstahl	[t]	2265,00 DM
Profilstahl	[t]	2400,00 DM

Tabelle A 8: Einheitspreise Stahlverbundstütze

Der Einheitspreis des Betons ist bei der Stahlverbundstütze geringer, da die Herstellung des Kammerbetons bei einer Stahlverbundstütze einfacher ist als der Betoniervorgang bei einer stehend geschalteten Stahlbetonstütze.

Beschreibung	Einheit	Einheitspreis
Betonstabstahl	[t]	2341,00 DM
Schalung	[m²]	97,20 DM
Beton	[m³]	230,00 DM

Tabelle A 9: Einheitspreise Flachdecke

Beschreibung	Einheit	Einheitspreis
Elementdecke (Ohne Aufbeton und Zulagebewehrung)	[m²]	24,00 DM
Aufbeton	[m³]	230,00 DM
Betonstabstahl	[t]	2341,00 DM
Betonmattenstahl	[t]	2222,00 DM

Tabelle A 10: Einheitspreise Stahlbetondecke

Beschreibung	Einheit	Einheitspreis
Trapezblech	[m²]	3261,40 DM
Aufbeton	[m³]	230,00 DM
Betonstabstahl	[t]	2341,00 DM
Betonmattenstahl	[t]	2222,00 DM
Abstützung	[ST]	35,00 DM

Tabelle A 11: Einheitspreise Verbunddecke

Beschreibung	Einheit	Einheitspreis
Schalung	[m <sup>2</sup> ]	177,00 DM
Betonstabstahl	[t]	2265,00 DM
Beton	[m <sup>3</sup> ]	261,00 DM

Tabelle A 12: Einheitspreise Stahlbetonträger

Beschreibung	Einheit	Einheitspreis
Profilstahl	[m <sup>2</sup> ]	2000,00 DM
Kammerbeton	[m <sup>3</sup> ]	230,00 DM
Betonstabstahl	[t]	2265,00 DM
Verdübelung	[St]	2,00 DM
Abstützung	[ST]	50,00 DM

Tabelle A 13: Einheitspreise Verbundträger

Der Einheitspreis des Betons ist beim Stahlverbundträger geringer, da die Herstellung des Kammerbetons bei einem Stahlverbundträger einfacher ist als der Betonvorgang eines Stahlbetonträgers.

#### A 4.2 Einheitspreise Ausbau

Beschreibung	Einheit	Einheitspreis
Gemauerte Trennwand	[m <sup>2</sup> ]	165 DM
Leichte Ständerwand	[m <sup>2</sup> ]	250 DM
Schwere Ständerwand	[m <sup>2</sup> ]	350 DM
Elementtrennwand	[m <sup>2</sup> ]	800 DM

Tabelle A 14: Kosten leichte Trennwände

Beschreibung	Einheit	Einheitspreis
Schwimmender Estrich	[m <sup>2</sup> ]	30 DM
Hohlraumboden	[m <sup>2</sup> ]	105 DM
Doppelboden	[m <sup>2</sup> ]	160 DM
Bodenbelag	[m <sup>2</sup> ]	100 DM

Tabelle A 15: Kosten Fußboden

Die geringen Preise bei Hohlraum- und Doppelböden kommen deshalb zustande, da nur noch die Kosten der zusätzlichen Leitungsführung berechnet werden müssen. Die Grundkosten der Böden sind bereits in den Kosten der Fußböden enthalten. Währenddessen muss bei Anordnung eines Fensterkanals dieser Kanal extra angebracht werden und verursacht somit diese Kosten.

Die Grundpreise für die Elektroinstallation sind aus [28] entnommen und entsprechend dem Baupreisindex umgerechnet. Als Berechnungsansatz wurden nun Kosten der Fußböden von den Installationskosten pro m<sup>2</sup> Grundfläche aus [28] subtrahiert. Die Ergebnisse werden als Kostenansatz für die Berechnung verwendet.

Beschreibung	Einheit	Einheitspreis
Decke unbehandelt	[m <sup>2</sup> ]	0 DM
Decke verputzt	[m <sup>2</sup> ]	60 DM
Abgehängte Decke	[m <sup>2</sup> ]	230 DM

*Tabelle A 16: Kosten Deckenbekleidung*

Beschreibung	Einheit	Einheitspreis
Heizungs- und Wasserinstallation	[m <sup>3</sup> ] BRI	85 DM
Elektroinstallation allgemein	[m <sup>3</sup> ] BRI	65 DM
Kabelkanal	[m <sup>2</sup> ] BGF	85 DM
Hohlraumboden	[m <sup>2</sup> ] BGF	35 DM
Doppelboden	[m <sup>2</sup> ] BGF	22 DM

*Tabelle A 17: Kosten Installation*



## A 5 Bewertungstabellen Flexibilitätskriterium

Deckenkonstruktion	Flexibilität
Flachdecke	2
Unterzugdecken, Unterzüge parallel zur Längsfassade	1
Unterzugdecken, Unterzüge in Gebäudequerrichtung	0

*Tabelle A 18: Flexibilität in Abhängigkeit der Deckenkonstruktion*

Stützenstellung	Flexibilität
einfeldige Konstruktion, zwei Stützenachsen	4
zweifeldige Konstruktion, drei Stützenachsen	3
dreifeldige Konstruktion, vier Stützenachsen	0

*Tabelle A 19: Flexibilität in Abhängigkeit der Stützenstellung*

Stellung der Außenstütze	Flexibilität
Stütze im Innenraum	0
Stützen an der Fassadeninnenseite	0
Stütze in der Fassade	1
Stütze auf der Fassadenaußenseite	2
Stütze außen vor der Fassade	2

*Tabelle A 20: Flexibilität in Abhängigkeit der Stellung der Außenstütze*

Stellung der Innenstütze	Flexibilität
Innenstütze im Flur vor der Trennwand	2
Innenstütze in der Schrankwand	0
Innenstütze in der Trennwandachse	0
Innenstütze auf anderer Flurseite (nur bei Kombibüros)	2
Innenstütze im Büro vor der Trennwand	1

*Tabelle A 21: Flexibilität in Abhängigkeit der Stellung der Innenstütze*

Rasterart	Flexibilität
Deckungsgleiches Ausbau- und Konstruktionsraster	1
Getrenntes Ausbau- und Konstruktionsraster	2

*Tabelle A 22: Flexibilität in Abhängigkeit der Rasterart*

Rasterart	Flexibilität
gemauerte Trennwände	0
leichte Metall- oder Holzständerwände	1
elementierte Trennwandsysteme	2

*Tabelle A 23: Flexibilität in Abhängigkeit des Trennwandsystems*

## A 6 Ergebnisse

Es werden hier die Ergebnisse der Vergleichsberechnungen zusammengestellt. Die Berechnungen wurden unter der Voraussetzung durchgeführt, dass die Trennwände an die Konstruktion angepasst sind.

Die Berechnungen wurden jeweils für Ortbeton- (bw=2) und Verbundbauweise (bw=4) durchgeführt. Zusätzlich dazu wurden die Vorgabepreise des Profilstahls variiert (siehe Kapitel 8). Für die Optimierung wurden die Crossoverwahrscheinlichkeit zu 0,50 und die Mutationswahrscheinlichkeit zu 0,08 festgelegt.

Zur Ermittlung der Fitnesswerte im Rahmen der Optimierung wurden nachfolgende Grenzwerte der Wertefunktion festgelegt. Diese Grenzwerte sind auf der Basis der Ergebnisse von vorangegangenen Berechnungen ermittelt worden.

	Herstellkosten	Rohbaukosten	Nutzungskosten	BRI	Flexibilität
min	1.800.000,- DM	150.000,- DM	150.000,- DM	2.400 m <sup>3</sup>	0
max	2.500.000,- DM	400.000,- DM	300.000,- DM	4.000 m <sup>3</sup>	12

*Tabelle A 24: Grenzen der Wertefunktion*

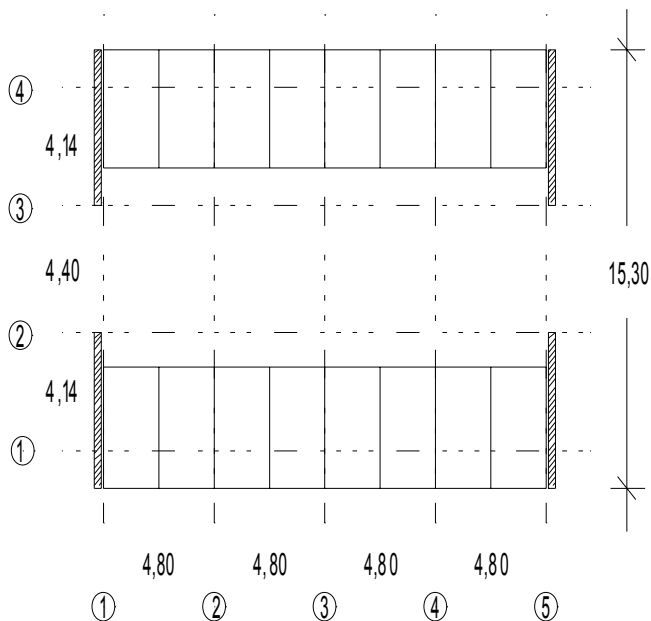
Da für die Verbundbauweise unterschiedliche Ergebnisse existieren, wurden die jeweiligen Geometrien in Abhängigkeit der Variation der Profilkosten untersucht. Diese Ergebnisse sind hier nachfolgend zusammengestellt.

Datei: C:\Eigene Dateien\Disseration\OPS-daten\Geo-a.ops; 09.08.99 16:28:09  
Ausführung in Ortbeton

twt	twd	dp	udt	hud	eli	hli	hi	fbt	hfb	ft	r	nb	ra	sta	dsta	stafac	astaf	lfas	lky
5	0,10	0,75	2	0,00	2	1	0,00	1	0,10	3	1,20	2	1	1	0,30	-0,50	1,16	-1,31	1,31
sti	dsti	astitw	gz	flurb	astp	bv	bfg	d	bw	st	dk	geo	Profilwahl	Deckenart	Mont	StTyp	FlexSteu		
4	0,30	0,00	2	1,10	0	2	0,00	2,00	2	9	3	1		1		2	1	2	1
l1	l2	bgm	b	nk	br	lgm	hg	hGM	nx	ny	nzi	bstr	tstr	Astr					
4,14	4,40	15,30	4,80	4	0,00	19,50	3,10	9,30	4	3	16	2,30	4,10	9,42					

Ausgabe der Kriterien:

Baukosten	
Rohbau	222.032 DM
Dachaufbau	174.162 DM
Fassade	506.359 DM
Fußboden	116.357 DM
Deckenbekleidung	0 DM
Kosten Trennwände	453.339 DM
Fußboden gegen Erde	35.802 DM
Elektroinst.	261.981 DM
Heizungs/Lüftungsinst.	235.846 DM
aktiver Brandschutz	0 DM
Summe Ausbauskosten	1.783.845 DM
Summe Herstellkosten	2.005.877 DM
Betriebskosten/a	
Kapitalkosten	164.445 DM
Energiekosten	6.667 DM
Reinigungskosten	37.217 DM
Betriebskosten/a	208.328 DM
BGF	895,05 m <sup>2</sup>
BRI	2774,66 m <sup>3</sup>
Trennwandfläche	804,72 m <sup>2</sup>
Kosten pro m <sup>2</sup> BGF	2241,08 DM/m <sup>2</sup>
Kosten pro m <sup>3</sup> BRI	722,93 DM/m <sup>3</sup>
Jahresenergiebedarf	95778,46 kWh/a
Gesamt Zimmeranzahl	48 Büros
Primärenergiebedarf	301692,49 kWh
Flexibilitätskriterium	4,00



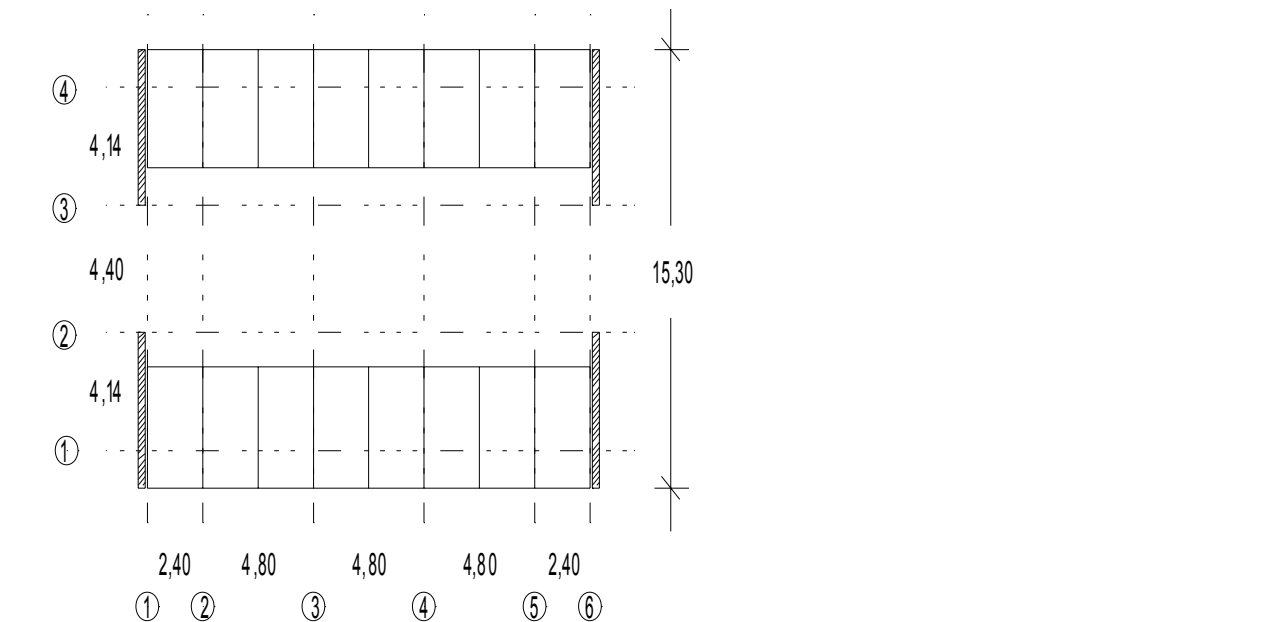
Ausführung in Ortbeton

twt	5	0,10	0,75	2	0,00	2	1	0,00	1	0,10	1	0,10	3	1,20	2	1	1	0,30	-0,50	1,06	-1,21	1,21
sti	4	0,30		0,00	2	1,10	0	2	0,00	2,00	2	9	3	3	1			2	1	2	1	
	11	12	bgm	b	nk	br	lgm	hg	hGM	nx	ny	nzi	bstr	tstr	Astr							
4,24	4,40	15,30	4,80	3	2,40	19,50	3,08	9,24	5	3	16	2,30	4,10	9,42								

Baukosten		
Rohbau	228.581	DM
Dachaufbau	174.162	DM
Fassade	503.141	DM
Fußboden	116.357	DM
Deckenbekleidung	0	DM
Kosten Trennwände	453.339	DM
Fußboden gegen Erde	35.802	DM
Elektroinst.	260.782	DM
Heizungs/Lüftungsinst.	234.324	DM
aktiver Brandschutz	0	DM
Summe Ausbaurkosten	1.777.906	DM
Summe Herstellkosten	2.006.487	DM

Betriebskosten/a	
Kapitalkosten	164.495 DM
Energiekosten	6.644 DM
Reinigungskosten	37.199 DM
Betriebskosten/a	208.338 DM

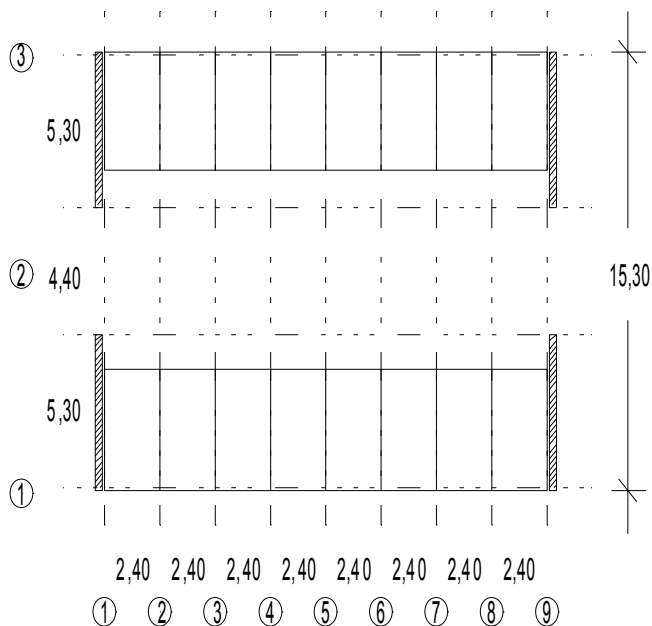
BGF	895,05	m²
BRI	2756,75	m³
Trennwandfläche	804,72	m²
Kosten pro m² BGF	2241,76	DM/m²
Kosten pro m³ BRI	727,84	DM/m³
Jahresenergiebedarf	95429,62	kWh/a
Gesamt Zimmeranzahl	48	Büros
Primärenergiebedarf	292785,50	kWh
Flexibilitätskriterium	4,00	



AUSWERTUNG GEOMETRIE 1-1 (3-feldiges System, geo=1, 2,40....2,40)

	B4	Bg	B1	B2	B3
	1.500 DM	2.000 DM	2.500 DM	3.000 DM	3.500 DM
	1.800 DM	2.400 DM	3.000 DM	3.600 DM	4.200 DM
Rohbau	229.216 DM	241.957 DM	254.698 DM	267.438 DM	280.179 DM
Dachaufbau	174.162 DM	174.162 DM	174.162 DM	174.162 DM	174.162 DM
Fassade	490.271 DM	490.271 DM	490.271 DM	490.271 DM	490.271 DM
Fußboden	116.357 DM	116.357 DM	116.357 DM	116.357 DM	116.357 DM
Deckenbekleidung	0 DM	0 DM	0 DM	0 DM	0 DM
Kosten Trennwände	453.177 DM	453.177 DM	453.177 DM	453.177 DM	453.177 DM
Fußboden gegen Erde	35.802 DM	35.802 DM	35.802 DM	35.802 DM	35.802 DM
Elektroinst.	255.984 DM	255.984 DM	255.984 DM	255.984 DM	255.984 DM
Heizungs/Lüftungsinst.	228.238 DM	228.238 DM	228.238 DM	228.238 DM	228.238 DM
aktiver Brandschutz	0 DM	0 DM	0 DM	0 DM	0 DM
Summe Ausbaurkosten	1.753.990 DM	1.753.990 DM	1.753.990 DM	1.753.990 DM	1.753.990 DM
Summe Herstellkosten	1.983.206 DM	1.995.947 DM	2.008.688 DM	2.021.428 DM	2.034.169 DM
Kapitalkosten	162.586 DM	163.631 DM	164.675 DM	165.720 DM	166.764 DM
Energiekosten	6.554 DM	6.554 DM	6.554 DM	6.554 DM	6.554 DM
Reinigungskosten	37.128 DM	37.128 DM	37.128 DM	37.128 DM	37.128 DM
Betriebskosten/a	206.269 DM	207.313 DM	208.358 DM	209.402 DM	210.447 DM
BGF	895,05 m²	895,05 m²	895,05 m²	895,05 m²	895,05 m²
BRI	2685,15 m³	2685,15 m³	2685,15 m³	2685,15 m³	2685,15 m³
Trennwandfläche	804,43 m²	804,43 m²	804,43 m²	804,43 m²	804,43 m²
Kosten pro m² BGF	2215,75 DM/m²	2229,98 DM/m²	2244,22 DM/m²	2258,45 DM/m²	2272,69 DM/m²
Kosten pro m³ BRI	738,58 DM/m³	743,33 DM/m³	748,07 DM/m³	752,82 DM/m³	757,56 DM/m³
Jahresenergiebedarf	94038,42 kWh/a	94038,42 kWh/a	94038,42 kWh/a	94038,42 kWh/a	94038,42 kWh/a
Gesamt Zimmeranzahl	48 Büros	48 Büros	48 Büros	48 Büros	48 Büros
Primärenergiebedarf	478159,05 kWh	478159,05 kWh	478159,05 kWh	478159,05 kWh	478159,05 kWh
Flexibilitätskrit.	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00

twt	twd	dp	udt	hud	eli	hli	hi	fbt	hfb	ft	r	nb	ra	sta	dsta	stafac	astaf	lfas	lky
5	0,10	0,75	2	0,00	2	1	0,00	1	0,10	3	1,20	1	1	2	0,30	-0,50	0,00	-0,15	0,15
sti	dsti	astitw	gz	flurb	astp	bv	bfg	d	bw	st	dk	geo	Profilwahl	Deckenart	Mont	StTyp	Flex	Steu	
4	0,30	0,00	2	1,10	0	2	0,00	2,00	4	9	3	3		2		2	1	1	1
11	12	bgm	b	nk	br	lgm	hg	hGM	nx	ny	nzi	bstr	tstr	Astr					
5,30	4,40	15,30	2,40	6	2,40	19,50	3,00	9,00	8	3	16	2,30	4,10	9,42					

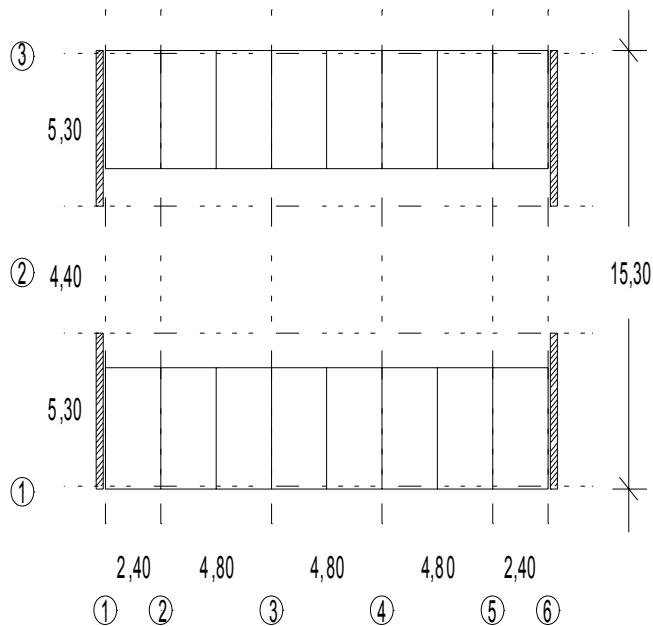


## Anhang A 6

AUSWERTUNG GEOMETRIE 1-2 (3-feldiges System, geo=3, 2,40 -4,80...4,40 - 2,40)

	B4	Bg	B1	B2	B3
	1.500 DM	2.000 DM	2.500 DM	3.000 DM	3.500 DM
	1.800 DM	2.400 DM	3.000 DM	3.600 DM	4.200 DM
Rohbau	213.479 DM	222.155 DM	230.831 DM	239.507 DM	248.182 DM
Dachaufbau	174.162 DM	174.162 DM	174.162 DM	174.162 DM	174.162 DM
Fassade	503.141 DM	503.141 DM	503.141 DM	503.141 DM	503.141 DM
Fußboden	116.357 DM	116.357 DM	116.357 DM	116.357 DM	116.357 DM
Deckenbekleidung	0 DM	0 DM	0 DM	0 DM	0 DM
Kosten Trennwände	453.339 DM	453.339 DM	453.339 DM	453.339 DM	453.339 DM
Fußboden gegen Erde	35.802 DM	35.802 DM	35.802 DM	35.802 DM	35.802 DM
Elektroinst.	260.782 DM	260.782 DM	260.782 DM	260.782 DM	260.782 DM
Heizungs/Lüftungsinst.	234.324 DM	234.324 DM	234.324 DM	234.324 DM	234.324 DM
aktiver Brandschutz	0 DM	0 DM	0 DM	0 DM	0 DM
Summe Ausbaukosten	1.777.906 DM	1.777.906 DM	1.777.906 DM	1.777.906 DM	1.777.906 DM
Summe Herstellkosten	1.991.385 DM	2.000.061 DM	2.008.737 DM	2.017.413 DM	2.026.089 DM
Kapitalkosten	163.257 DM	163.968 DM	164.679 DM	165.390 DM	166.102 DM
Energiekosten	6.644 DM	6.644 DM	6.644 DM	6.644 DM	6.644 DM
Reinigungskosten	37.199 DM	37.199 DM	37.199 DM	37.199 DM	37.199 DM
Betriebskosten/a	207.100 DM	207.811 DM	208.522 DM	209.234 DM	209.945 DM
BGF	895,05 m²	895,05 m²	895,05 m²	895,05 m²	895,05 m²
BRI	2756,75 m³	2756,75 m³	2756,75 m³	2756,75 m³	2756,75 m³
Trennwandfläche	804,72 m²	804,72 m²	804,72 m²	804,72 m²	804,72 m²
Kosten pro m² BGF	2224,89 DM/m²	2234,58 DM/m²	2244,27 DM/m²	2253,97 DM/m²	2263,66 DM/m²
Kosten pro m³ BRI	722,37 DM/m³	725,51 DM/m³	728,66 DM/m³	731,81 DM/m³	734,95 DM/m³
Jahresenergiebedarf	95429,62 kWh/a	95429,62 kWh/a	95429,62 kWh/a	95429,62 kWh/a	95429,62 kWh/a
Gesamt Zimmeranzahl	48 Büros	48 Büros	48 Büros	48 Büros	48 Büros
Primärenergiebedarf	382446,43 kWh	382446,43 kWh	382446,43 kWh	382446,43 kWh	382446,43 kWh
Flexibilitätskriter.	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00

tw	td	dp	udt	hud	eli	hli	hi	fbt	hfb	ft	r	nb	ra	sta	dsta	stafac	astaf	lfas	lky
5	0,10	0,75	2	0,00	2	1	0,00	1	0,10	3	1,20	2	1	2	0,30	-0,50	0,00	-0,15	0,15
sti	dsti	astitw	gz	flurb	astp	bv	bfg	d	bw	st	dk	geo	Profilwahl	Deckenart	Mont	StTyp	FlexSteu		
4	0,30	0,00	2	1,10	0	2	0,00	2,00	4	9	3	3		2		1	1	1	1
11	12	bgm	b	nk	br	lgm	hg	hGM	nx	ny	nzi	bstr	tstr	Astr					
5,30	4,40	15,30	4,80	3	2,40	19,50	3,08	9,24	5	3	16	2,30	4,10	9,42					



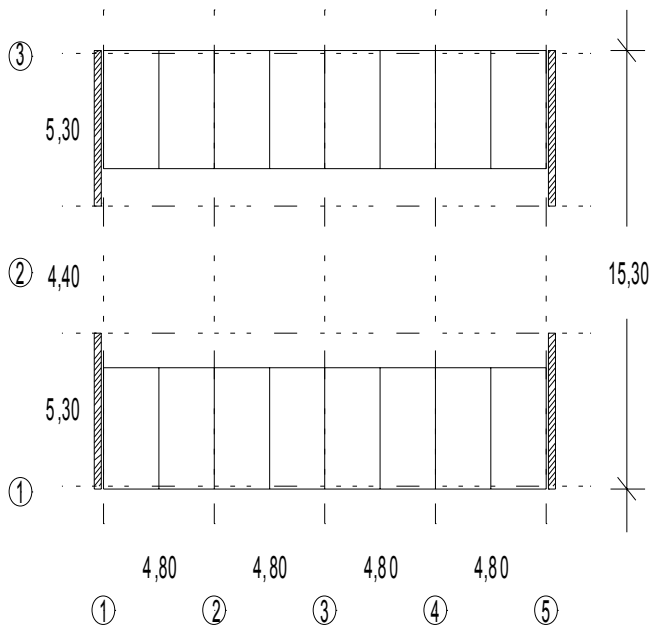
AUSWERTUNG GEOMETRIE 1-3 (3-feldiges System, geo=1, 4,80...4,80)

	B4	Bg	B1	B2	B3
	1.500 DM	2.000 DM	2.500 DM	3.000 DM	3.500 DM
	1.800 DM	2.400 DM	3.000 DM	3.600 DM	4.200 DM
Rohbau	213.254 DM	220.259 DM	227.264 DM	234.269 DM	241.274 DM
Dachaufbau	174.162 DM	174.162 DM	174.162 DM	174.162 DM	174.162 DM
Fassade	511.185 DM	511.185 DM	511.185 DM	511.185 DM	511.185 DM
Fußboden	116.357 DM	116.357 DM	116.357 DM	116.357 DM	116.357 DM
Deckenbekleidung	0 DM	0 DM	0 DM	0 DM	0 DM
Kosten Trennwände	458.196 DM	458.196 DM	458.196 DM	458.196 DM	458.196 DM
Fußboden gegen Erde	35.802 DM	35.802 DM	35.802 DM	35.802 DM	35.802 DM
Elektroinst.	263.780 DM	263.780 DM	263.780 DM	263.780 DM	263.780 DM
Heizungs/Lüftungsinst.	238.128 DM	238.128 DM	238.128 DM	238.128 DM	238.128 DM
aktiver Brandschutz	0 DM	0 DM	0 DM	0 DM	0 DM
Summe Ausbaukosten	1.797.610 DM	1.797.610 DM	1.797.610 DM	1.797.610 DM	1.797.610 DM
Summe Herstellkosten	2.010.864 DM	2.017.869 DM	2.024.874 DM	2.031.879 DM	2.038.884 DM
Kapitalkosten	164.854 DM	165.428 DM	166.002 DM	166.576 DM	167.151 DM
Energiekosten	6.701 DM	6.701 DM	6.701 DM	6.701 DM	6.701 DM
Reinigungskosten	37.243 DM	37.243 DM	37.243 DM	37.243 DM	37.243 DM
Betriebskosten/a	208.798 DM	209.372 DM	209.946 DM	210.520 DM	211.095 DM
BGF	895,05 m²	895,05 m²	895,05 m²	895,05 m²	895,05 m²
BRI	2801,51 m³	2801,51 m³	2801,51 m³	2801,51 m³	2801,51 m³
Trennwandfläche	813,34 m²	813,34 m²	813,34 m²	813,34 m²	813,34 m²
Kosten pro m² BGF	2246,65 DM/m²	2254,48 DM/m²	2262,30 DM/m²	2270,13 DM/m²	2277,96 DM/m²
Kosten pro m³ BRI	717,78 DM/m³	720,28 DM/m³	722,78 DM/m³	725,28 DM/m³	727,78 DM/m³
Jahresenergiebedarf	96302,49 kWh/a	96302,49 kWh/a	96302,49 kWh/a	96302,49 kWh/a	96302,49 kWh/a
Gesamt Zimmeranzahl	48 Büros	48 Büros	48 Büros	48 Büros	48 Büros
Primärenergiebedarf	373863,26 kWh	373863,26 kWh	373863,26 kWh	373863,26 kWh	373863,26 kWh
Flexibilitätskrit.	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00

```

tw twd dp udt hud eli hli hi fbt hfb ft r nb ra sta dsta stafac astaf lfas lky
5 0,10 0,75 2 0,00 2 1 0,00 1 0,10 3 1,20 2 1 2 0,30 -0,50 0,00 -0,15 0,15
sti dsti astitw gz flurb astp bv bfg d bw st dk geo Profilwahl Deckenart Mont StTyp FlexSteu
4 0,30 0,00 2 1,10 0 2 0,00 2,00 4 9 3 1 2 1 1 1 1
11 12 bgm b nk br lgm hg hGM nx ny nzi bstr tstr Astr
5,30 4,40 15,30 4,80 4 0,00 19,50 3,13 9,39 4 3 16 2,30 4,10 9,42

```

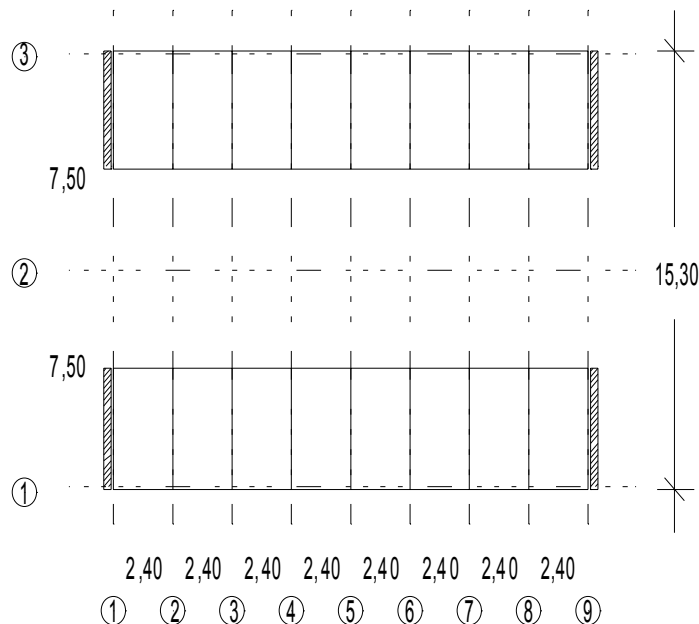


# Anhang A 6

AUSWERTUNG GEOMETRIE 2-1 (2-feldiges System, geo=1, 2,40...2,40)

	B4	Bg	B1	B2	B3
	1.500 DM	2.000 DM	2.500 DM	3.000 DM	3.500 DM
	1.800 DM	2.400 DM	3.000 DM	3.600 DM	4.200 DM
Rohbau	215.291 DM	227.824 DM	240.356 DM	252.889 DM	265.421 DM
Dachaufbau	174.162 DM	174.162 DM	174.162 DM	174.162 DM	174.162 DM
Fassade	505.087 DM	505.087 DM	505.087 DM	505.087 DM	505.087 DM
Fußboden	116.357 DM	116.357 DM	116.357 DM	116.357 DM	116.357 DM
Deckenbekleidung	0 DM	0 DM	0 DM	0 DM	0 DM
Kosten Trennwände	458.034 DM	458.034 DM	458.034 DM	458.034 DM	458.034 DM
Fußboden gegen Erde	35.802 DM	35.802 DM	35.802 DM	35.802 DM	35.802 DM
Elektroinst.	257.783 DM	257.783 DM	257.783 DM	257.783 DM	257.783 DM
Heizungs/Lüftungsinst.	230.520 DM	230.520 DM	230.520 DM	230.520 DM	230.520 DM
aktiver Brandschutz	0 DM	0 DM	0 DM	0 DM	0 DM
Summe Ausbaurkosten	1.777.745 DM	1.777.745 DM	1.777.745 DM	1.777.745 DM	1.777.745 DM
Summe Herstellkosten	1.993.036 DM	2.005.569 DM	2.018.101 DM	2.030.634 DM	2.043.166 DM
Kapitalkosten	163.392 DM	164.420 DM	165.447 DM	166.474 DM	167.502 DM
Energiekosten	6.588 DM	6.588 DM	6.588 DM	6.588 DM	6.588 DM
Reinigungskosten	37.303 DM	37.303 DM	37.303 DM	37.303 DM	37.303 DM
Betriebskosten/a	207.282 DM	208.310 DM	209.337 DM	210.365 DM	211.392 DM
BGF	895,05 m²	895,05 m²	895,05 m²	895,05 m²	895,05 m²
BRI	2712,00 m³	2712,00 m³	2712,00 m³	2712,00 m³	2712,00 m³
Trennwandfläche	813,05 m²	813,05 m²	813,05 m²	813,05 m²	813,05 m²
Kosten pro m² BGF	2226,73 DM/m²	2240,73 DM/m²	2254,74 DM/m²	2268,74 DM/m²	2282,74 DM/m²
Kosten pro m³ BRI	734,90 DM/m³	739,52 DM/m³	744,14 DM/m³	748,76 DM/m³	753,38 DM/m³
Jahresenergiebedarf	94559,35 kWh/a	94559,35 kWh/a	94559,35 kWh/a	94559,35 kWh/a	94559,35 kWh/a
Gesamt Zimmeranzahl	48 Büros	48 Büros	48 Büros	48 Büros	48 Büros
Primärenergiebedarf	453933,11 kWh	453933,11 kWh	453933,11 kWh	453933,11 kWh	453933,11 kWh
Flexibilitätskriter.	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00

twt	twd	dp	udt	hud	eli	hli	hi	fbt	hfb	ft	r	nb	ra	sta	dsta	stafac	astaf	lfas	lky
5	0,10	0,75	2	0,00	2	1	0,00	1	0,10	3	1,20	1	1	2	0,30	-0,50	0,00	-0,15	0,15
sti	dsti	astitw	gz	flurb	astp	bv	bfg	d	bw	st	dk	geo	Profilwahl	Deckenart	Mont	StTyp	FlexSteu		
4	0,30	0,00	2	1,10	0	2	0,00	2,00	4	3	3	1	2	2	1	1	1		
11	12	bgm	b nk	br	lgm	hg	hgm	nx	ny	nzi	bstr	tstr	Astr						
7,50	7,50	15,30	2,40	8	0,00	19,50	3,03	9,09	8	2	16	2,30	4,10	9,42					

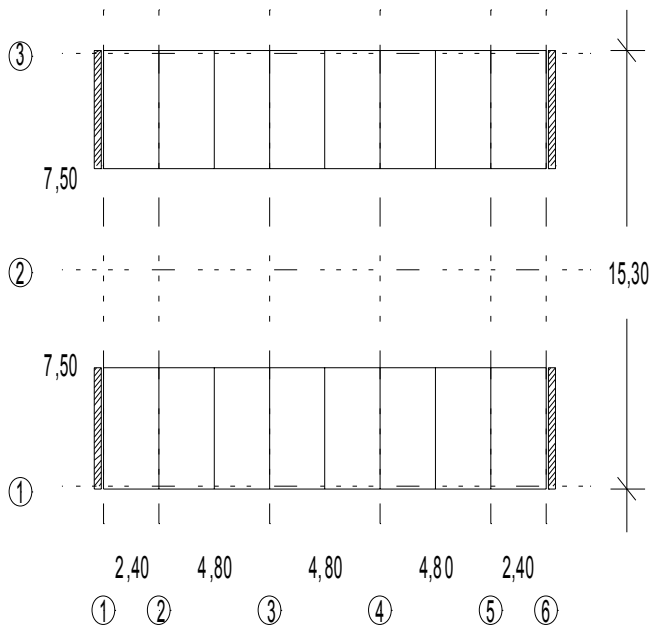




AUSWERTUNG GEOMETRIE 2-2a (2-feldiges System, geo=3, 2,40 - 4,80...4,80 - 2,40, mit Montagestützen, Profilwahl nach Fläche)

	B4	Bg	B1	B2	B3
	1.500 DM	2.000 DM	2.500 DM	3.000 DM	3.500 DM
	1.800 DM	2.400 DM	3.000 DM	3.600 DM	4.200 DM
Rohbau	204.215 DM	212.828 DM	221.441 DM	230.054 DM	238.666 DM
Dachaufbau	174.162 DM	174.162 DM	174.162 DM	174.162 DM	174.162 DM
Fassade	523.147 DM	523.147 DM	523.147 DM	523.147 DM	523.147 DM
Fußboden	116.357 DM	116.357 DM	116.357 DM	116.357 DM	116.357 DM
Deckenbekleidung	0 DM	0 DM	0 DM	0 DM	0 DM
Kosten Trennwände	463.053 DM	463.053 DM	463.053 DM	463.053 DM	463.053 DM
Fußboden gegen Erde	35.802 DM	35.802 DM	35.802 DM	35.802 DM	35.802 DM
Elektroinst.	264.380 DM	264.380 DM	264.380 DM	264.380 DM	264.380 DM
Heizungs/Lüftungsinst.	238.889 DM	238.889 DM	238.889 DM	238.889 DM	238.889 DM
aktiver Brandschutz	0 DM	0 DM	0 DM	0 DM	0 DM
Summe Ausbaurkosten	1.815.789 DM	1.815.789 DM	1.815.789 DM	1.815.789 DM	1.815.789 DM
Summe Herstellkosten	2.020.004 DM	2.028.617 DM	2.037.230 DM	2.045.843 DM	2.054.456 DM
Kapitalkosten	165.603 DM	166.309 DM	167.015 DM	167.721 DM	168.427 DM
Energiekosten	6.712 DM	6.712 DM	6.712 DM	6.712 DM	6.712 DM
Reinigungskosten	37.405 DM	37.405 DM	37.405 DM	37.405 DM	37.405 DM
Betriebskosten/a	209.720 DM	210.426 DM	211.132 DM	211.838 DM	212.545 DM
BGF	895,05 m²	895,05 m²	895,05 m²	895,05 m²	895,05 m²
BRI	2810,46 m³	2810,46 m³	2810,46 m³	2810,46 m³	2810,46 m³
Trennwandfläche	821,96 m²	821,96 m²	821,96 m²	821,96 m²	821,96 m²
Kosten pro m² BGF	2256,86 DM/m²	2266,48 DM/m²	2276,11 DM/m²	2285,73 DM/m²	2295,35 DM/m²
Kosten pro m³ BRI	718,75 DM/m³	721,81 DM/m³	724,87 DM/m³	727,94 DM/m³	731,00 DM/m³
Jahresenergiebedarf	96477,37 kWh/a	96477,37 kWh/a	96477,37 kWh/a	96477,37 kWh/a	96477,37 kWh/a
Gesamt Zimmeranzahl	48 Büros	48 Büros	48 Büros	48 Büros	48 Büros
Primärenergiebedarf	373345,21 kWh	373345,21 kWh	373345,21 kWh	373345,21 kWh	373345,21 kWh
Flexibilitätskrit.	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00

tw	td	dp	udt	hud	eli	hli	hi	fbt	hfb	ft	r	nb	ra	sta	dsta	stafac	astaf	lfas	lky
5	0,10	0,75	2	0,00	2	1	0,00	1	0,10	3	1,20	2	1	2	0,30	-0,50	0,00	-0,15	0,15
sti	dsti	astitw	gz	flurb	astp	bv	bfg	d	bw	st	dk	geo	Profilwahl	Deckenart	Mont	StTyp	Flex	Steu	
4	0,30	0,00	2	1,10	0	2	0,00	2,00	4	3	3	3		2		1	2	1	1
11	12	bgm	b	nk	br	lgm	hg	hGM	nx	ny	nzi	bstr	tstr	Astr					
7,50	7,50	15,30	4,80	3	2,40	19,50	3,14	9,42	5	2	16	2,30	4,10	9,42					

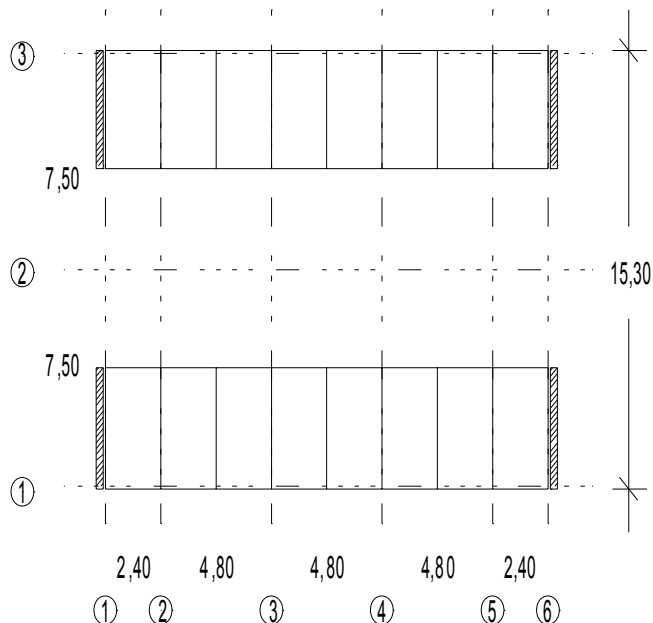


## Anhang A 6

AUSWERTUNG GEOMETRIE 2-2b (2-feldiges System, geo=3, 2,40 - 4,80...4,80 - 2,40, mit Montagestützen, Profilwahl nach Höhe)

	B4	Bg	B1	B2	B3
	1.500 DM	2.000 DM	2.500 DM	3.000 DM	3.500 DM
	1.800 DM	2.400 DM	3.000 DM	3.600 DM	4.200 DM
Rohbau	215.533 DM	227.867 DM	240.202 DM	252.536 DM	264.871 DM
Dachaufbau	174.162 DM	174.162 DM	174.162 DM	174.162 DM	174.162 DM
Fassade	513.296 DM	513.296 DM	513.296 DM	513.296 DM	513.296 DM
Fußboden	116.357 DM	116.357 DM	116.357 DM	116.357 DM	116.357 DM
Deckenbekleidung	0 DM	0 DM	0 DM	0 DM	0 DM
Kosten Trennwände	453.339 DM	453.339 DM	453.339 DM	453.339 DM	453.339 DM
Fußboden gegen Erde	35.802 DM	35.802 DM	35.802 DM	35.802 DM	35.802 DM
Elektroinst.	260.782 DM	260.782 DM	260.782 DM	260.782 DM	260.782 DM
Heizungs/Lüftungsinst.	234.324 DM	234.324 DM	234.324 DM	234.324 DM	234.324 DM
aktiver Brandschutz	0 DM	0 DM	0 DM	0 DM	0 DM
Summe Ausbaukosten	1.788.061 DM	1.788.061 DM	1.788.061 DM	1.788.061 DM	1.788.061 DM
Summe Herstellkosten	2.003.594 DM	2.015.928 DM	2.028.263 DM	2.040.597 DM	2.052.932 DM
Kapitalkosten	164.258 DM	165.269 DM	166.280 DM	167.291 DM	168.302 DM
Energiekosten	6.644 DM	6.644 DM	6.644 DM	6.644 DM	6.644 DM
Reinigungskosten	37.349 DM	37.349 DM	37.349 DM	37.349 DM	37.349 DM
Betriebskosten/a	208.251 DM	209.262 DM	210.273 DM	211.285 DM	212.296 DM
BGF	895,05 m²	895,05 m²	895,05 m²	895,05 m²	895,05 m²
BRI	2756,75 m³	2756,75 m³	2756,75 m³	2756,75 m³	2756,75 m³
Trennwandfläche	804,72 m²	804,72 m²	804,72 m²	804,72 m²	804,72 m²
Kosten pro m² BGF	2238,53 DM/m²	2252,31 DM/m²	2266,09 DM/m²	2279,87 DM/m²	2293,65 DM/m²
Kosten pro m³ BRI	726,79 DM/m³	731,27 DM/m³	735,74 DM/m³	740,22 DM/m³	744,69 DM/m³
Jahresenergiebedarf	95429,62 kWh/a	95429,62 kWh/a	95429,62 kWh/a	95429,62 kWh/a	95429,62 kWh/a
Gesamt Zimmeranzahl	48 Büros	48 Büros	95429,62 kWh/a	48 Büros	48 Büros
Primärenergiebedarf	422523,30 kWh	422523,30 kWh	422523,30 kWh	422523,30 kWh	422523,30 kWh
Flexibilitätskriter.	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00

tw	td	dp	udt	hud	eli	hli	hi	fbt	hfb	ft	r	nb	ra	sta	dsta	stafac	astaf	lfas	lky
5	0,10	0,75	2	0,00	2	1	0,00	1	0,10	3	1,20	2	1	2	0,30	-0,50	0,00	-0,15	0,15
sti	dsti	astitw	gz	flurb	astp	bv	bfg	d	bw	st	dk	geo	Profilwahl	Deckenart	Mont	StTyp	FlexSteu		
4	0,30	0,00	2	1,10	0	2	0,00	2,00	4	3	3	3		1		2	1		1
11	12	bgm	b	nk	br	lgm	hg	hGM	nx	ny	nzi	bstr	tstr	Astr					
7,50	7,50	15,30	4,80	3	2,40	19,50	3,08	9,24	5	2	16	2,30	4,10	9,42					



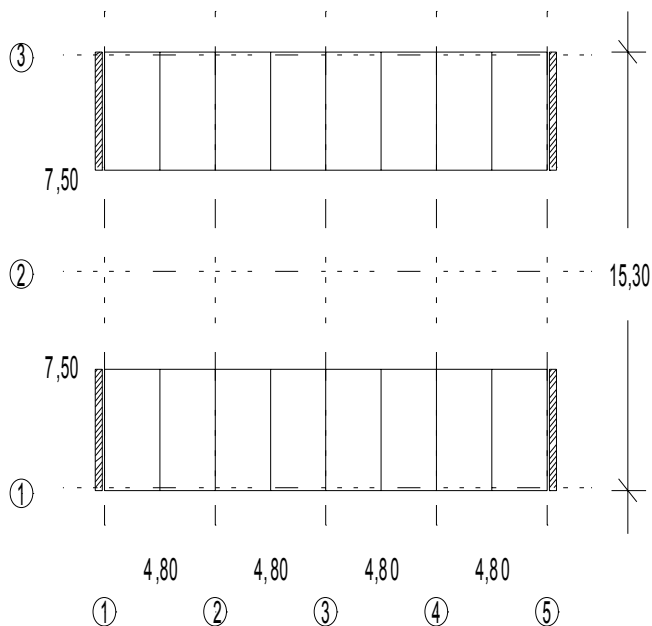
AUSWERTUNG GEOMETRIE 2-3a (2-feldiges System, geo=1, 4,80...4,80, mit Montagestützen, Profilwahl nach Fläche)

	B4	Bg	B1	B2	B3
	1.500 DM	2.000 DM	2.500 DM	3.000 DM	3.500 DM
	1.800 DM	2.400 DM	3.000 DM	3.600 DM	4.200 DM
Rohbau	203.410 DM	210.321 DM	217.232 DM	224.144 DM	231.055 DM
Dachaufbau	174.162 DM	174.162 DM	174.162 DM	174.162 DM	174.162 DM
Fassade	526.430 DM	526.430 DM	526.430 DM	526.430 DM	526.430 DM
Fußboden	116.357 DM	116.357 DM	116.357 DM	116.357 DM	116.357 DM
Deckenbekleidung	0 DM	0 DM	0 DM	0 DM	0 DM
Kosten Trennwände	463.053 DM	463.053 DM	463.053 DM	463.053 DM	463.053 DM
Fußboden gegen Erde	35.802 DM	35.802 DM	35.802 DM	35.802 DM	35.802 DM
Elektroinst.	265.579 DM	265.579 DM	265.579 DM	265.579 DM	265.579 DM
Heizungs/Lüftunginst.	240.410 DM	240.410 DM	240.410 DM	240.410 DM	240.410 DM
aktiver Brandschutz	0 DM	0 DM	0 DM	0 DM	0 DM
Summe Ausbaurkosten	1.821.794 DM	1.821.794 DM	1.821.794 DM	1.821.794 DM	1.821.794 DM
Summe Herstellkosten	2.025.204 DM	2.032.115 DM	2.039.026 DM	2.045.937 DM	2.052.848 DM
Kapitalkosten	166.029 DM	166.596 DM	167.162 DM	167.729 DM	168.296 DM
Energiekosten	6.735 DM	6.735 DM	6.735 DM	6.735 DM	6.735 DM
Reinigungskosten	37.424 DM	37.424 DM	37.424 DM	37.424 DM	37.424 DM
Betriebskosten/a	210.188 DM	210.754 DM	211.321 DM	211.888 DM	212.454 DM
BGF	895,05 m²	895,05 m²	895,05 m²	895,05 m²	895,05 m²
BRI	2828,36 m³	2828,36 m³	2828,36 m³	2828,36 m³	2828,36 m³
Trennwandfläche	821,96 m²	821,96 m²	821,96 m²	821,96 m²	821,96 m²
Kosten pro m² BGF	2262,67 DM/m²	2270,39 DM/m²	2278,11 DM/m²	2285,84 DM/m²	2293,56 DM/m²
Kosten pro m³ BRI	716,04 DM/m³	718,48 DM/m³	720,92 DM/m³	723,37 DM/m³	725,81 DM/m³
Jahresenergiebedarf	96827,45 kWh/a	96827,45 kWh/a	96827,45 kWh/a	96827,45 kWh/a	96827,45 kWh/a
Gesamt Zimmeranzahl	48 Büros	48 Büros	48 Büros	48 Büros	48 Büros
Primärenergiebedarf	361449,30 kWh	361449,30 kWh	361449,30 kWh	361449,30 kWh	361449,30 kWh
Flexibilitätskrit.	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00

```

tw twd dp udt hud eli hli hi fbt hfb ft r nb ra sta dsta stafac astaf lf as lky
5 0,10 0,75 2 0,00 2 1 0,00 1 0,10 3 1,20 2 1 2 0,30 -0,50 0,00 -0,15 0,15
sti dsti astitw gz flurb astp bv bfg d bw st dk geo Profilwahl Deckenart Mont StTyp FlexSteu
4 0,30 0,00 2 1,10 0 2 0,00 2,00 4 3 3 1 2 1 2 1 1
11 12 bgm b nk br lgm hg hGM nx ny nzi bstr tstr Astr
7,50 7,50 15,30 4,80 4 0,00 19,50 3,16 9,48 4 2 16 2,30 4,10 9,42

```

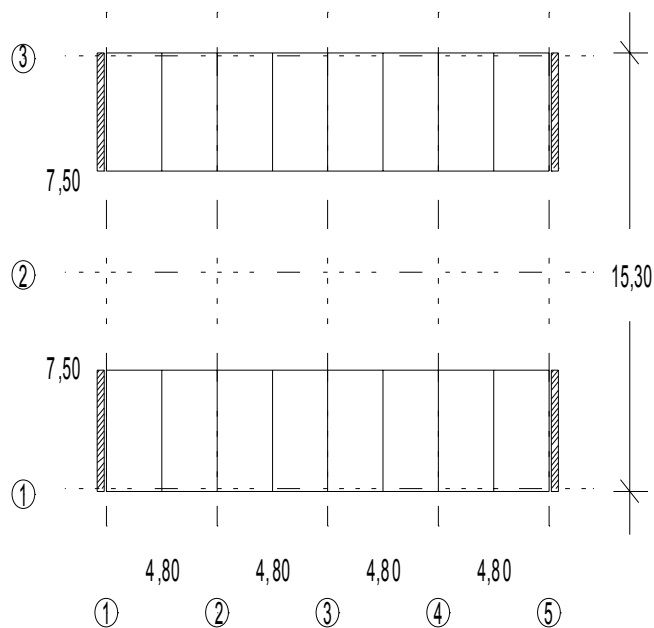


## Anhang A 6

AUSWERTUNG GEOMETRIE 2-3b (2-feldiges System, geo=1, 4,80...4,80, mit Montagestützen, Profilwahl nach Höhe)

	B4	Bg	B1	B2	B3
	1.500 DM	2.000 DM	2.500 DM	3.000 DM	3.500 DM
	1.800 DM	2.400 DM	3.000 DM	3.600 DM	4.200 DM
Rohbau	211.258 DM	220.825 DM	230.391 DM	239.958 DM	249.525 DM
Dachaufbau	174.162 DM	174.162 DM	174.162 DM	174.162 DM	174.162 DM
Fassade	516.579 DM	516.579 DM	516.579 DM	516.579 DM	516.579 DM
Fußboden	116.357 DM	116.357 DM	116.357 DM	116.357 DM	116.357 DM
Deckenbekleidung	0 DM	0 DM	0 DM	0 DM	0 DM
Kosten Trennwände	453.339 DM	453.339 DM	453.339 DM	453.339 DM	453.339 DM
Fußboden gegen Erde	35.802 DM	35.802 DM	35.802 DM	35.802 DM	35.802 DM
Elektroinst.	261.981 DM	261.981 DM	261.981 DM	261.981 DM	261.981 DM
Heizungs/Lüftungsinst.	235.846 DM	235.846 DM	235.846 DM	235.846 DM	235.846 DM
aktiver Brandschutz	0 DM	0 DM	0 DM	0 DM	0 DM
Summe Ausbaukosten	1.794.066 DM	1.794.066 DM	1.794.066 DM	1.794.066 DM	1.794.066 DM
Summe Herstellkosten	2.005.323 DM	2.014.890 DM	2.024.457 DM	2.034.024 DM	2.043.591 DM
Kapitalkosten	164.399 DM	165.184 DM	165.968 DM	166.752 DM	167.537 DM
Energiekosten	6.667 DM	6.667 DM	6.667 DM	6.667 DM	6.667 DM
Reinigungskosten	37.368 DM	37.368 DM	37.368 DM	37.368 DM	37.368 DM
Betriebskosten/a	208.434 DM	209.218 DM	210.003 DM	210.787 DM	211.571 DM
BGF	895,05 m²	895,05 m²	895,05 m²	895,05 m²	895,05 m²
BRI	2774,66 m³	2774,66 m³	2774,66 m³	2774,66 m³	2774,66 m³
Trennwandfläche	804,72 m²	804,72 m²	804,72 m²	804,72 m²	804,72 m²
Kosten pro m² BGF	2240,46 DM/m²	2251,15 DM/m²	2261,84 DM/m²	2272,53 DM/m²	2283,21 DM/m²
Kosten pro m³ BRI	722,73 DM/m³	726,18 DM/m³	729,62 DM/m³	733,07 DM/m³	736,52 DM/m³
Jahresenergiebedarf	95778,46 kWh/a	95778,46 kWh/a	95778,46 kWh/a	95778,46 kWh/a	95778,46 kWh/a
Gesamt Zimmeranzahl	48 Büros	48 Büros	48 Büros	48 Büros	48 Büros
Primärenergiebedarf	396195,27 kWh	396195,27 kWh	396195,27 kWh	396195,27 kWh	396195,27 kWh
Flexibilitätskrit.	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00

tw	td	dp	ud	h	eli	hli	hi	fbt	hfb	ft	r	nb	ra	sta	dsta	stafac	astaf	lfas	lky
5	0,10	0,75	2	0,00	2	1	0,00	1	0,10	3	1,20	2	1	2	0,30	-0,50	0,00	-0,15	0,15
sti	dsti	astitw	gz	flurb	astp	bv	bfg	d	bw	st	dk	geo	Profilwahl	Deckenart	Mont	StTyp	FlexSteu		
4	0,30	0,00	2	1,10	0	2	0,00	2,00	4	3	3	1		1	1	2	1	1	
11	12	bgm	b	nk	br	lgm	hg	hGM	nx	ny	nzi	bstr	tstr	Astr					
7,50	7,50	15,30	4,80	4	0,00	19,50	3,10	9,30	4	2	16	2,30	4,10	9,42					







## Lebenslauf

Name: Martin Christoph Siffling

Geboren: in Karlsruhe 02. September 1967

Schulausbildung: Grundschule in Karlsruhe-Durlach 1973 - 1977  
Markgrafengymnasium 1977 - 1986

Abitur: 21. Juni 1986

Wehrdienst: Kfz-Instandsetzungseinheit 01. Juli 1986  
Calw / Schwarzwald 30. September 1987

Studium: Bauingenieurwesen  
Universität Stuttgart WS 87/88 - SS 90  
University of Calgary, Kanada WS 90/91 - SS 91  
(Stipendiat des DAAD)  
Universität Stuttgart WS 91/92 - WS 92/93

Diplom: Abschlußnote „sehr gut“ 17. Dezember 1992

Berufliche Tätigkeit: Mitarbeiter im Ingenieurbüro Dr. Schütz 01. Februar 1993  
Kempten/Allgäu bis 31. August 1994

- Entwurfs- und Ausführungsplanung im Brückenbau
- Ausführungsplanung von Hochbauten
- Erstellung von Sanierungsgutachten für historische Gebäude

Wiss. Assistent an der TU Braunschweig 05. September 1994  
Institut für Baukonstruktionen + Industriebau bis 04. September 2000  
Prof. Helmut C. Schulitz

- Promotion  
„Ansatz zur ganzheitlichen Entwurfsoptimierung am Beispiel von Bürogeschoßbauten“
- Lehre  
Tragwerksplanung, Entwurfsbetreuung, Baukonstruktion
- Veröffentlichungen  
Mitarbeit am neuen Stahlbauatlas

Eigenes Ingenieurbüro für Tragwerksplanung seit Juli 1996